



TUGAS AKHIR TF141581

**ANALISIS AERODINAMIKA GEDUNG E TEKNIK FISIKA
ITS DENGAN VARIASI KECEPATAN ARAH DAN
KECEPATAN ANGIN**

INDRA WIJAYA
NRP. 02311645000027

Dosen Pembimbing
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018



FINAL PROJECT TF141581

***ANALYSIS OF AERODYNAMICS FORCE IN E BUILDING
PHYSICS ENGINEERING ITS WITH VARIOUS SPEED
AND WIND DIRECTIONS***

INDRA WIJAYA
NRP. 02311645000027

Supervisor
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

*Department Of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018*

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS AERODINAMIKA GEDUNG E TEKNIK FISIKA ITS DENGAN VARIASI ARAH DAN KECEPATAN ANGIN

TUGAS AKHIR

Oleh:

INDRA WIJAYA

NRP: 02311645000027

Surabaya, 19 Juli 2018
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing,



Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

NIPN. 19761223 200501 1 001

**Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS**



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D

NIP: 19780902 200312 1 002

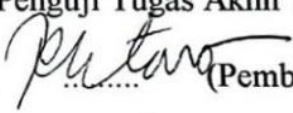

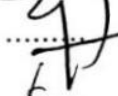

**ANALISIS AERODINAMIKA GEDUNG E TEKNIK
FISIKA ITS DENGAN VARIASI ARAH DAN KECEPATAN
ANGIN**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Energi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
INDRA WIJAYA
NRP. 02311645000027

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  (Pembimbing)
2. Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA  (Ketua Penguji)
3. Dr. Suyanto, S.T., M.T.  (Penguji 1)
4. Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T.  (Penguji 2)

**SURABAYA
JULI 2018**

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Indra Wijaya
NRP : 02311645000027
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS GAYA AERODINAMIKA GEDUNG E TEKNIK FISIKA ITS DENGAN VARIASI ARAH DAN KECEPATAN ANGIN” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 19 Juni 2018
Yang membuat pernyataan,

Indra Wijaya

ANALISIS AERODINAMIKA GEDUNG E TEKNIK FISIKA ITS DENGAN VARIASI KECEPATAN DAN ARAH ANGIN

Nama : Indra Wijaya
NRP : 02311645000027
Departemen : Teknik Fisika, FTI-ITS
Pembimbing : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

ABSTRAK

Perubahan pola dan kecepatan angin akan mempengaruhi gaya aerodinamika pada suatu bangunan. Perubahan pola aliran angin karena berinteraksi dengan bangunan selalu berdampak pada area di sekitar bangunan tersebut. Selain itu, perubahan aliran angin akan menyebabkan perubahan gaya dan tekanan pada permukaan bangunan yang dapat mempengaruhi strukturnya. Gedung E adalah salah satu sarana pembelajaran yang dimiliki oleh Departemen Teknik Fisika ITS dan merupakan bangunan dengan bentuk unik. Keunikan dari geometri bangunan ini akan membuat interaksinya terhadap perubahan pola dan kecepatan angin menjadi menarik untuk diteliti. Untuk mengetahui pengaruh geometri Gedung E terhadap perubahan arah dan kecepatan aliran angin dapat dilakukan simulasi komputer menggunakan analisis numerik metode elemen hingga. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tidak adanya sepasang vorteks dibelakang Gedung E karena pengaruh bangunan di sekitar gedung tersebut. Keberadaan Gedung E juga mampu menurunkan kecepatan aliran angin sebanyak 30% . Gaya dorong yang diterima oleh Gedung E sebesar 215000,6 N dengan koefisien gaya dorong sebesar 2,031.

Kata kunci : Kecepatan angin, gaya dorong, Gedung E

ANALYSIS OF AERODYNAMICS FORCE IN E BUILDING PHYSICS ENGINEERING ITS WITH VARIOUS SPEED AND WIND DIRECTIONS

Name : Indra Wijaya
NRP : 02311645000027
Department : Physics Engineering , FTI- ITS
Supervisor : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

ABSTRACT

Changes in pattern and wind speed will affect the aerodynamics forces in building. Changes in pattern of wind flow due to interaction with building always have an impact on the surrounding area. In addition, changes in wind flow will changing force and pressure on the surface of the building and may affect its structure. E Building is one of the learning facilities that owned by Department of Engineering Physics ITS and it has unique shape. The uniqueness of the building will make its interaction with changing pattern and wind speed has been interesting to study. The influence of E Building with wind speed and direction changes can be done by numerical simulation using finite element method. The results shows that there is no pair of vortex behind E Building because of building around it. The existance of E Building is also able to reduce speed of wind flow up to 30%. The drag force that E Building receive is 215000,6 N and the coefficient force is 2,031.

Keywords : Wind speed, Drag force, E Building

KATA PENGANTAR

Puji syukur kita panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas limpahan rahmat serta anugerah-Nya lah penulis dapat menyusun dan menyelesaikan laporan yang berjudul

ANALISIS AERODINAMIKA GEDUNG E TEKNIK FISIKA ITS DENGAN VARIASI ARAH DAN KECEPATAN ANGIN

Dalam kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkenan membantu pada tahap penyusunan hingga selesainya laporan ini, khususnya kepada:

1. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T, M.Si, Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
2. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T selaku dosen pembimbing yang dengan sabar mengarahkan dan memberi masukan serta memberikan motivasi kepada penulis.
3. Bapak Dr. Totok Suhartanto, DEA, Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. , dan Ibu Lizda Johar Mawarni, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan banyak masukan sehingga laporan ini menjadi lebih baik.
4. Bapak Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan Teknik Fisika ITS.
5. Seluruh Bapak/Ibu dosen pengajar di Departemen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan banyak ilmunya sehingga penulis dapat menyelesaikan pendidikan di Teknik Fisika ITS.
6. Seluruh staff Departemen Teknik Fisika ITS yang telah membantu dalam pengurusan administrasi.
7. Keluarga penulis yang telah memberikan dukungan moral dan material kepada penulis.

8. Teman – teman di Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan Teknik Fisika ITS atas bantuan dan motivasinya.
9. Teman – teman Lintas Jalur 2016 atas kenangan, motivasi dan bantuan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terima kasih atas bantuannya

Penulis sadar bahwa laporan tugas akhir ini tentunya tidak lepas dari banyaknya kekurangan, baik dari aspek kualitas maupun kuantitas dari bahan penelitian yang dipaparkan. Semua ini murni didasari oleh keterbatasan yang dimiliki penulis.

Oleh sebab itu, penulis membutuhkan kritik dan saran kepada segenap pembaca yang bersifat membangun untuk lebih meningkatkan kualitas dikemudian hari. Semoga laporan tugas akhir ini dapat membantu dan bermanfaat.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR NOTASI	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Rumusan masalah.....	2
1.3 Batasan masalah	3
1.4 Tujuan	3
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1 Angin	5
2.2 Respon bangunan terhadap angin	6
2.3 Gaya aerodinamika pada bangunan.....	8
2.4 Model Turbulensi	11
2.5 <i>Finite Method Element</i>	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Diagram alir penelitian	17
3.2 Pelaksanaan penelitian	17
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Hasil simulasi dari ke empat arah.....	27
4.2 Pola aliran disekitar Gedung E.....	52
4.3 Pengaruh keberadaan Gedung E.....	55

4.4 Gaya aerodinamika pada Gedung E	57
4.5 Pengaruh Gedung E terhadap lingkungan	59
 BAB V PENUTUP	 63
5.1 Kesimpulan.....	63
5.2 Saran	63
 DAFTAR PUSTAKA.....	 65
BIODATA PENULIS.....	67
LAMPIRAN	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tekanan pada bangunan (Holmes, 2001)	6
Gambar 2.2 Gaya angin pada bangunan (Holmes, 2001)	7
Gambar 2.3 Aliran mengenai benda padat (Holmes, 2001)	8
Gambar 2.4 <i>Wind axes</i> dan <i>body axes</i> (Holmes, 2001)	10
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	17
Gambar 3.2 Data kecepatan angin	18
Gambar 3.3 Data arah angin	19
Gambar 3.4 Geometri gedung E	20
Gambar 3.5 Penamaan geometri Gedung E	20
Gambar 3.6 Geometri untuk validasi	21
Gambar 3.7 Visualisasi pengaturan <i>mesh</i>	22
Gambar 3.8 Kecepatan aliran acuan vs validasi	23
Gambar 4.1 Aliran angin disekitar gedung E	28
Gambar 4.2 Pola aliran arah barat tampak atas	29
Gambar 4.3 Pola aliran arah barat tampak samping	29
Gambar 4.4 Distribusi kecepatan arah barat tampak atas	30
Gambar 4.5 Distribusi tekanan arah barat tampak atas	32
Gambar 4.6 Grafik tekanan terhadap posisi Gedung E dari arah barat	33
Gambar 4.7 Grafik tekanan terhadap ketinggian Gedung E dari arah barat	33
Gambar 4.8 Pola aliran dari arah barat laut tampak atas	35
Gambar 4.9 Pola aliran dari arah barat laut tampak samping	36
Gambar 4.10 Distribusi kecepatan arah barat laut tampak atas	37
Gambar 4.11 Distribusi tekanan dari arah barat laut tampak atas	38
Gambar 4.12 Grafik tekanan terhadap posisi Gedung E dari arah barat laut	39
Gambar 4.13 Grafik tekanan terhadap ketinggian Gedung E dari arah barat laut	40
Gambar 4.14 Pola aliran dari arah utara tampak atas	42
Gambar 4.15 Pola aliran dari arah utara tampak samping	42
Gambar 4.16 Distribusi kecepatan dari arah utara tampak atas	43

Gambar 4.17 Distribusi tekanan dari arah utara tampak atas	44
Gambar 4.18 Grafik tekanan terhadap posisi Gedung E dari arah utara	45
Gambar 4.19 Grafik tekanan terhadap ketinggian Gedung E dari arah utara	46
Gambar 4.20 Pola aliran dari arah timur tampak atas	48
Gambar 4.21 Pola aliran dari arah timur tampak samping	48
Gambar 4.22 Distribusi kecepatan dari arah timur tampak atas	49
Gambar 4.23 Distribusi tekanan dari timur tampak atas	50
Gambar 4.24 Grafik tekanan terhadap posisi Gedung E dari arah timur	51
Gambar 4.25 Grafik tekanan terhadap ketinggian Gedung E dari arah timur	52
Gambar 4.26 Geometri bangunan di lingkungan Teknik Fisika ITS	53
Gambar 4.27 Pola aliran di lingkungan Teknik Fisika	54
Gambar 4.28 Distribusi kecepatan di lingkungan Teknik Fisika	55
Gambar 4.29 Distribusi tekanan di lingkungan Teknik Fisika	56
Gambar 4.30 Kontur rasio angin	57
Gambar 4.31 Grafik tekanan terhadap posisi Gedung E	58
Gambar 4.32 Grafik tekanan terhadap ketinggian Gedung E	58
Gambar 4.33 Bangunan di Departemen Teknik Fisika	60

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Pengaturan pada <i>basic setting</i>	22
Tabel 3.2 Pengaturan pada <i>fluids model</i>	23
Tabel 3.3 Variasi sensitifitas <i>meshing</i>	24
Tabel 3.4 Uji model turbulensi	25
Tabel 4.1 Hasil simulasi arah barat	27
Tabel 4.2 Hasil simulasi arah barat daya	34
Tabel 4.3 Hasil simulasi arah utara	40
Tabel 4.4 Hasil simulasi arah timur	46

DAFTAR NOTASI

C_d	: Koefisien gaya dorong
C_p	: Koefisien tekanan
F	: Gaya (N atau kg.m/s)
ρ	: Densitas (kg/m ³)
U_o	: Kecepatan aliran bebas (m/s)
U	: Kecepatan aliran pada lapisan batas (m/s)
U_b	: Kecepatan aliran di belakang objek (m/s)
A	: Luas (m ²)
μ	: Viskositas (Ns/m ²)
P	: Tekanan (Pa atau kg/m/s ²)
u	: Kecepatan sumbu x (m/s)
v	: Kecepatan sumbu y (m/s)
w	: Kecepatan sumbu z (m/s)
t	: Waktu (s)
λ	: Koefisien viskositas
f_x	: Gaya pada sumbu x (N)
f_y	: Gaya pada sumbu y (N)
f_z	: Gaya pada sumbu z (N)
$\nabla . V$: Perubahan volume tiap waktu
τ	: Tegangan-regangan (Pa)
q	: heat flux
T	: temperatur (C)
K	: rasio angin

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Sekarang ini, efek pemanasan global semakin terasa. Menurut *Environmental Protection Agency* Amerika Serikat, pemanasan global adalah sebuah fenomena terjadinya peningkatan temperatur rata-rata di bumi yang dipengaruhi oleh penambahan gas efek rumah kaca (metana dan karbon dioksida) pada atmosfer. Penambahan gas rumah kaca secara berlebihan akan menyebabkan panas yang ditahan oleh atmosfer meningkat sehingga temperatur rata – rata di bumi akan meningkat. Pemanasan global akan meningkatkan temperatur permukaan air laut dan mengubah pola curah hujan terutama pada daerah tropis yang akan mengakibatkan perubahan iklim di bumi. Perubahan curah hujan terutama pada daerah tropis akan menyebabkan badai lebih sering terjadi dan angin akan bertiup lebih cepat dengan pola yang berbeda [1].

Perubahan pola dan kecepatan angin akan mempengaruhi gaya aerodinamik pada suatu bangunan. Perubahan pola aliran angin karena berinteraksi dengan bangunan selalu berdampak pada area di sekitar bangunan tersebut. Selain itu, perubahan aliran angin akan menyebabkan perubahan gaya dan tekanan pada permukaan bangunan yang dapat mempengaruhi strukturnya [2]. Distribusi tekanan akan berkaitan dengan pola aliran, bentuk geometri bangunan, lingkungan sekitar dan faktor lain [3]. Lebih dari itu, interaksi angin juga dapat menyebabkan kegagalan pada struktur bangunannya [4].

Sebelumnya Jie Song [5] melakukan penelitian terhadap dua buah bangunan yang saling berhubungan menggunakan jembatan hubung. Dalam penelitian ini digunakan dengan eksperimen *Wind Tunnel High Frequency Base Balance* dengan variasi panjang jembatan dan juga arah angin 0° dan juga 90° . Pada penelitian ini dibahas gaya aerodinamika di dalam dan di luar bangunan uji. Hasil dari penelitian ini menyebutkan bahwa perubahan geometri dapat menyebabkan perubahan distribusi tekanan di luar bangunan. Pengaruh jembatan di antara kedua gedung menyebabkan

berkurangnya gaya aerodinamika di bagian depan gedung (mengurangi beban pada struktur), sedangkan di bagian dalam tidak mengalami perubahan yang signifikan.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Yan Zhang disimpulkan bahwa arah angin akan mempengaruhi distribusi tekanan dan juga aliran. Perubahan pola aliran akan menyebabkan perubahan pola aliran setelah melewati bangunan, dimana kecepatan tertinggi berada tepat dibelakang bangunan [6]. Kondisi angin di dekat permukaan tanah merupakan faktor yang penting untuk menentukan kualitas udara karena bangunan. Dampak adanya bangunan membuat angin menjadi gangguan bagi lingkungannya (terutama manusia) karena ketinggian bangunan. Tinggi bangunan membuat adanya peningkatan kecepatan aliran angin yang menyebabkan ketidaknyamanan bahkan bahaya bagi lingkungannya [7].

Gedung E adalah salah satu sarana pembelajaran yang dimiliki oleh departemen Teknik Fisika ITS. Gedung E merupakan bangunan dengan bentuk unik yang memiliki 2 ketinggian yang berbeda. Keunikan dari geometri bangunan ini akan membuat interaksinya dengan perubahan pola dan kecepatan angin menjadi menarik untuk diteliti. Sebagai upaya untuk mengantisipasi dampak perubahan pola dan kecepatan angin di area sekitar Gedung E maka perlu dilakukan sebuah penelitian. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pola aliran di sekitar Gedung E karena interaksinya dengan angin yang berubah pola dan kecepatannya, serta dampak dari aliran tersebut di sekitar Gedung E

1.2 Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah yang terdapat pada tugas akhir ini adalah

1. Bagaimana pola aliran angin di sekitar Gedung E terhadap perubahan arah dan kecepatan angin ?
2. Apa pengaruh geometri Gedung E terhadap aliran angin di lingkungan sekitarnya ?
3. Bagaimana gaya aerodinamika pada Gedung E ?

1.3 Batasan masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini antara lain :

1. Gedung yang disimulasikan adalah Gedung E Teknik Fisika ITS dan tidak mempertimbangkan turbulensi karena pengaruh gedung – gedung di sekitar Gedung E.
2. Aliran angin yang digunakan adalah jenis turbulen.
3. Gaya aerodinamika yang dibahas adalah gaya dorong.

1.4 Tujuan

Berdasarkan permasalahan yang ada didapatkan tujuan dari tugas akhir ini yaitu

1. Mengetahui pola aliran angin di sekitar Gedung E terhadap perubahan arah dan kecepatan angin.
2. Menganalisa pengaruh geometri Gedung E terhadap aliran angin di lingkungan sekitarnya.
3. Mengetahui gaya aerodinamika pada Gedung E

(Halaman Ini Sengaja dikosongkan)

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Angin

Pengaruh langsung yang dirasakan Bumi sebagai akibat dari radiasi matahari adalah adanya perbedaan suhu. Jumlah energi matahari yang masuk ke permukaan bumi bergantung pada lama penyinaran yang ditentukan oleh posisi matahari. Semakin lama matahari menyinari bumi semakin banyak energi yang akan diserap dan berujung pada peningkatan temperatur di bumi.

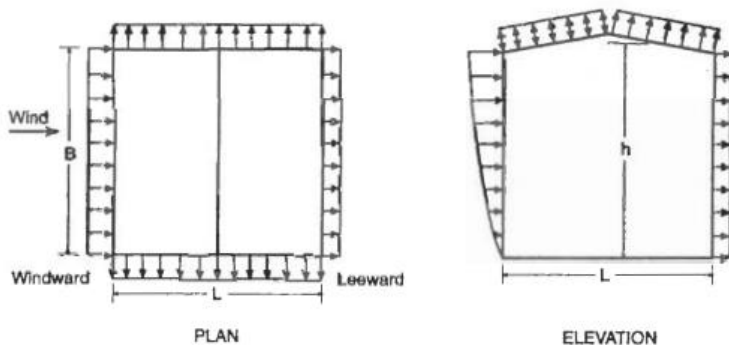
Peningkatan temperatur di bumi juga akan mempengaruhi temperatur udara di bumi. Temperatur udara adalah panas atau dinginnya udara. Perubahan temperatur udara disebabkan oleh kombinasi kerja antara udara, air dan permukaan bumi [8]. Temperatur udara berbeda antara satu tempat dengan tempat lain tergantung bentuk dan ketinggian permukaan bumi. Peningkatan temperatur udara akan menyebabkan terjadinya perubahan massa jenis dan viskositas udara. Semakin tinggi temperature udara maka massa jenis udara akan berkurang dan viskositas udara akan meningkat. Hukum Boyle menyebutkan bahwa penambahan temperatur pada suatu gas akan menyebabkan kenaikan tekanan.

Faktor kedua yang mempengaruhi dinamika udara adalah tekanan udara, yaitu tenaga yang bekerja untuk menggerakkan massa udara dalam satu wilayah tertentu dari suatu tempat ke tempat lain. Tekanan udara sangat dipengaruhi oleh kerapatan (densitas) massa udara. Semakin tinggi densitas udara maka akan semakin tinggi pula tekanan udaranya [9]. Perbedaan tekanan udara di berbagai wilayah di muka bumi menyebabkan terjadinya gerakan massa udara dari daerah bertekanan tinggi menuju ke daerah bertekanan rendah.

Angin adalah massa udara yang bergerak. Angin dapat bergerak secara horizontal maupun vertikal dengan kecepatan variasi dan fluktuasi secara dinamis [10]. Angin dapat bergerak karena adanya perbedaan temperatur di permukaan bumi yang disebabkan oleh radiasi sinar matahari. Saat matahari menyinari bumi, banyak energi panas dari gelombangnya yang diserap oleh

atmosfer. Diserap oleh udara di mesosfer (antara 80 hingga 50 km dari permukaan bumi). Sehingga sinar matahari tidak mempunyai energi lagi untuk diserap oleh udara (antara 50 hingga 2 km dari permukaan bumi dan temperatur nya akan akan lebih rendah dibandingkan dengan permukaan tanah [10]

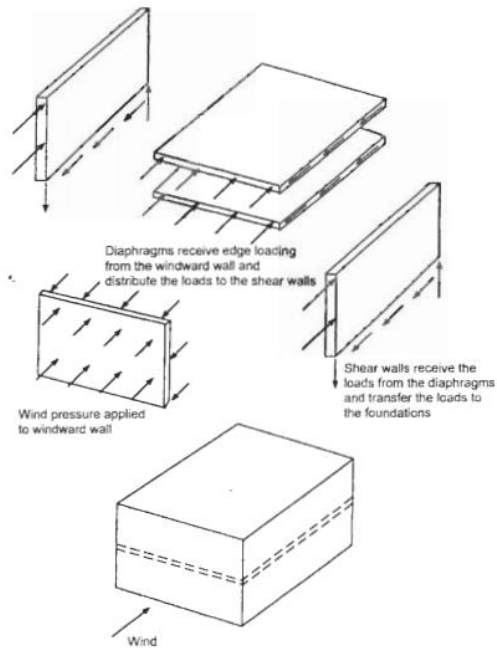
Secara umum, gaya yang terjadi karena interaksi angin dengan adalah berupa tekanan yang ada di permukaan bangunan [2]. Pada Gambar 2.1 terlihat bahwa tekanan positif bekerja pada bagian *windward* dan tekanan negatif bekerja pada bagian *leeward*. Di luar bangunan, zona bertekanan tinggi dimana angin datang disebut sebagai *windward*, sedangkan zona bertekanan rendah di dalam bangunan disebut dengan *leeward*. Interaksi angin dengan permukaan bangunan akan menyebabkan perubahan aliran udara.



Gambar 2.1 Tekanan pada bangunan (Holmes, 2001)

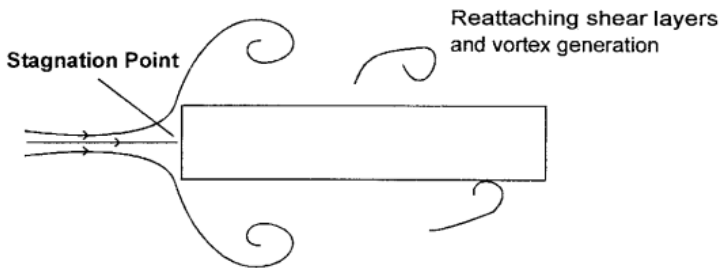
2.2 Respon bangunan terhadap angin

Interaksi angin dengan bangunan dapat dilihat pada Gambar 2.2. *Windward* menerima tekanan angin dan mengirimkan gaya yang dihasilkan ke atap dan lantai. Selanjutnya gaya akan diteruskan ke sistem *lateral-force-resisting* bangunan dalam bentuk tembok yang bergetar searah dengan angin, setelahnya gaya akan diteruskan ke kerangka bangunan [2].



Gambar 2.2 Gaya angin pada bangunan (Holmes, 2001)

Interaksi angin dengan bangunan sama dengan interaksi fluida terhadap *bluff body*. Dapat dilihat dalam Gambar 2.3 bahwa angin datang yang terhalang oleh benda padat akan terpisah (bergeser menuju bagian atas dan bawah benda tersebut). Angin yang terpisah akan menyatu kembali pada permukaan benda padat. Tetapi karena ketidakstabilannya akan terbentuk pusaran di permukaan dan berlangsung sepanjang permukaan benda padat tersebut [2]. Beban pada struktur bangunan ditentukan dari penjumlahan antara tekanan dalam dan tekanan luar yang bekerja pada struktur tersebut. Tekanan dalam bangunan tidak dipengaruhi oleh aliran angin di luar bangunan [11].



Gambar 2.3 Aliran mengenai benda padat (Holmes, 2001)

2.3 Gaya aerodinamika pada bangunan

Ketika objek bergerak melalui udara, terdapat gaya yang dihasilkan oleh gerakan relatif antara udara dan permukaan bodi, studi tentang gaya – gaya yang dihasilkan oleh udara disebut aerodinamika. Aerodinamika memiliki rentang aplikasi yang luas terutama di bidang teknik penerbangan, dalam perancangan mobil, dan prediksi gaya – gaya yang terjadi pada kapal dan layar, di bidang teknik sipil seperti dalam desain jembatan dan bangunan lainnya. Aerodinamika adalah ilmu yang mempelajari tentang aliran udara dalam segala situasi beserta pengaruh yang ditimbulkan pada benda yang berada didalamnya. Bagian-bagian yang dipelajari dalam aerodinamika mencakup sifat dan gaya, terutama udara atau gas-gas lain, serta akibat-akibat yang ditimbulkan ketika benda padat masuk kedalam alirannya.

Seperti yang disebutkan sebelumnya, bahwa interaksi angin dengan bangunan akan sama dengan interaksi fluida terhadap *bluff body*. Dalam mekanika fluida *bluff body* berarti segala objek yang ketika aliran air melewati *boundary* nya aliran air tidak sepenuhnya menyentuh *boundary* objek tersebut. Aliran air akan lebih dulu terseparasi oleh permukaan objek tersebut dibandingkan dengan ujung (sudut) objek tersebut yang menimbulkan *wake zone* menjadi besar. Kemudian gaya dorong yang dihasilkan oleh tekanan akan lebih besar dibandingkan dengan gaya dorong karena

gesekan objek. Separasi aliran oleh *bluff body* akan menyebabkan terbentuknya 2 vorteks di belakang objek tersebut [12].

Menurut Balai Besar Teknologi Aerodinamika, Aeroelastika dan Aeroakustika (BBTA3) pengujian aerodinamika pada suatu gedung dapat dilakukan dengan mempertimbangkan gaya (angkat dan dorong) dan juga tekanan serta visualisasi aliran. Gaya dan tekanan yang bekerja pada permukaan bangunan karena berinteraksi dengan bangunan akan disimbolkan dengan sebuah angka yang dikenal dengan koefisien gaya dan koefisien tekanan dengan tujuan untuk memudahkan analisis.

2.3.1 Koefisien tekanan

Bagian luar dari *boundary layer* aliran pada benda padat adalah *invisid* (nol viskositas), *irrotational flow* (nol pusaran) dengan tekanan p dan kecepatan U . Dalam fluida terkait dengan persamaan Bernoulli [13]

$$p + \frac{1}{2} \rho_{\alpha} U^2 = \text{cons} \quad (2.1)$$

Merujuk pada tekanan dan kecepatan yang tidak dipengaruhi oleh p_0 dan ρ_0 maka didapatkan :

$$p + \frac{1}{2} \rho_{\alpha} U^2 = p_0 + \frac{1}{2} \rho_{\alpha} U_0^2 \quad (2.2)$$

Atau dapat ditulis menjadi

$$p_0 - p = \frac{1}{2} \rho_{\alpha} (U_0^2 - U^2) \quad (2.3)$$

Tekanan permukaan pada benda biasanya dinyatakan dalam bentuk non dimensional , koefisien tekanan :

$$C_p = \frac{\frac{1}{2} \rho_{\alpha} (U_0^2 - U^2)}{\frac{1}{2} \rho_{\alpha} U_0^2 A} = 1 - \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \quad (2.4)$$

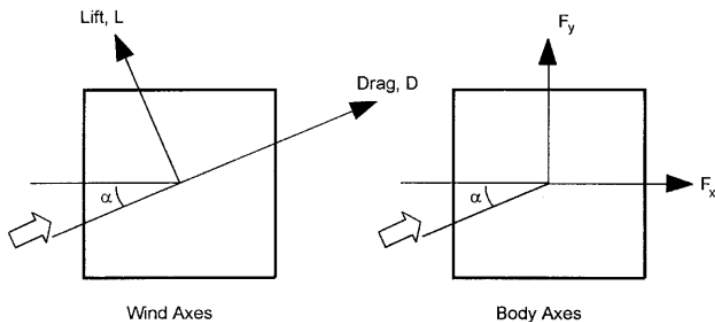
$(1/2) \rho_a U_o^2$ disebut sebagai tekanan dinamik. Pada titik stagnasi saat $U = 0$ koefisien tekanannya akan bernilai 1. Tetapi koefisien tekanan pada *windward* bangunan biasanya kurang dari 1 [13]. Pada daerah dimana kecepatan aliran lebih besar dibandingkan U_o , koefisien tekanan akan bernilai negatif. Persamaan bernoulli tidak valid untuk aliran terpisah dan daerah dimana *wake* muncul.

2.3.2 Koefisien gaya

Koefisien gaya didefinisikan secara non-dimensional sama seperti koefisien tekanan :

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho_a U_o^2 A} \quad (2.5)$$

Dimana F adalah total gaya aerodinamik dan A adalah luas benda.



Gambar 2.4 *Wind axes dan body axes* (Holmes, 2001)

Gaya aerodinamik secara konvensional diselesaikan kedalam 2 arah ortogonal yang paralel dan tegak lurus terhadap angin (atau rata-rata angin untuk aliran turbulen). 2 arah tersebut biasa disebut *wind axes* dan *body axes* yang ditunjukkan oleh Gambar 2.4. Mengikuti terminologi aeronautika, gaya *lift* dan *drag* dianggap

sebagai gaya *cross-wind* dan *along-wind*. Gaya *lift* dan *drag* dapat dicari dengan mengganti nilai F dengan D dan L [13].

2.4 Model Turbulensi

Semua aliran yang terjadi dalam dunia engineering baik aliran yang sederhana maupun aliran kompleks akan dipengaruhi oleh viskositas dan bilangan Reynolds. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Osborn Reynolds menyebutkan bahwa aliran dengan bilangan Reynolds kecil lapisan – lapisan fluidanya akan saling bergerak satu sama lain dalam gerakan yang teratur. Aliran semacam ini disebut aliran laminar. Jika aliran memiliki bilangan Reynolds yang besar terjadi fenomena kompleks yang berujung pada perubahan karakteristik aliran. Kecepatan akan bervariasi secara acak dalam bentuk yang tidak teratur. Aliran ini disebut juga dengan aliran turbulen.

Model turbulensi adalah prosedur untuk mendekatkan sistem persamaan *mean flow* sehingga masalah aliran yang bervariasi dapat dihitung. Secara garis besar, model turbulensi digunakan untuk memodifikasi persamaan Navier – Stokes *unsteady* dengan memperkenalkan kuantitas rata – rata dan besar fluktuasi untuk menghasilkan persamaan Reynolds Averaged Navier Stokes [14].

2.4.1 K-epsilon

Model turbulensi ini sangat banyak digunakan dan sudah tervalidasi. Model ini telah berhasil menghitung berbagai macam variasi aliran *thin shear layer* serta *recirculating flow* tanpa menyesuaikan dengan model tiap kasus. Model ini telah sering dipakai dalam mempelajari aliran seperti dispersi polutan di udara. Namun model ini juga memiliki kelemahan dalam menangani masalah *swirling flow* dan aliran dengan lapisan batas yang melengkung dikarenakan model ini tidak mengandung pengaruh *streamline* yang melengkung pada turbulensi Berikut ini adalah beberapa kelebihan dan kelemahan model k-epsilon

- Kelebihan
 - Model turbulensi paling sederhana dimana hanya membutuhkan kondisi batas dan atau kondisi awalnya.
 - Sudah tervalidasi untuk menangani aliran dalam dalam ruang lingkup yang besar.
- Kekurangan
 - Kemampuan kurang dalam menangani aliran dengan batas – batas yang tidak menentu, aliran dengan lapisan batas melengkung.

2.5 *Finite Method Element*

Finite element merupakan salah satu dari metode numerik yang memanfaatkan operasi matrix untuk menyelesaikan masalah-masalah fisik. Metode lain yang adalah metode analitik, yang untuk melakukannya diperlukan suatu persamaan matematik yang merupakan model dari perilaku fisik. Semakin rumit perilaku fisiknya (karena kerumitan bentuk geometri, banyaknya interaksi beban, constrain, sifat material, dan sebagainya) maka semakin sulit atau bahkan mustahil di bangun suatu model matematik yang bisa mewakili permasalahan tersebut. Alternatif metodenya adalah dengan cara membagi kasus tadi menjadi bagian-bagian kecil yang sederhana yang mana pada bagian kecil tersebut kita bisa membangun model matematik dengan lebih sederhana. Kemudian interaksi antar bagian kecil tersbut ditentukan berdasarkan fenomena fisik yang akan diselesaikan. Metode ini dikenal sebagai metode elemen hingga, karena kita membagi permasalahan menjadi sejumlah elemen tertentu (*finite*) untuk mewakili permasalahan yang sebenarnya jumlah elemennya adalah tidak berhingga (kontinum) [15].

Metode Elemen Hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan problem matematis dari suatu gejala fisis. Adapun dasar dari metode elemen hingga yaitu, membagi benda kerja menjadi elemen-elemen kecil

yang jumlahnya berhingga sehingga dapat menghitung reaksi akibat beban (*load*) pada kondisi batas (*boundary condition*) yang diberikan [16]. Tipe masalah teknis dan matematis fisis yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga terbagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok analisa struktur dan kelompok masalah-masalah non-struktur.

Tipe-tipe permasalahan struktur meliputi :

1. Analisa getaran atau *stress*, meliputi analisa *truss* dan *frame* serta masalah-masalah yang berhubungan dengan tegangan-tegangan yang terkonsentrasi.
2. *Buckling*
3. Analisa getaran

Problem non-struktur yang dapat dipecahkan dengan metode ini meliputi :

1. Perpindahan panas dan massa
2. Mekanika fluida, termasuk aliran fluida lewat media porus
3. Distribusi dari potensial listrik dan potensial magnet

Pembebanan terhadap struktur yang kompleks, pada umumnya sulit dipecahkan melalui matematika analisis. Hal ini disebabkan karena matematika analisis memerlukan besaran atau harga yang harus diketahui pada setiap titik pada struktur yang dikaji. Penyelesaian analisis dari suatu persamaan differensial suatu geometri yang kompleks, pembebanan yang rumit, tidak mudah diperoleh. Formulasi dari metode elemen hingga dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan ini.

Saat ini, banyak sekali software FEM beredar dengan berbagai mutu dan kemudahan. Software ini biasanya mudah untuk digunakan (*user-friendly*) tapi pada satu sisi sangat mahal harganya. Contoh dari software ini adalah MSC.NASTRAN, ABAQUS, ANSYS, LSDYNA, dan lainnya. Pengguna software FEM kemudian terbiasa melihat GUI (*Graphical User Interface*) di mana suatu benda didiskritisasi menjadi sekian puluh bahkan ribu elemen. Istilah baru kemudian muncul yaitu *Finite Element Modeling*, karena pengguna hanya memodelkan fisik suatu benda

dengan elemen-elemen kecil, mendefinisikan sifat-sifat material, memberikan kondisi batas dan pembebanan, menjalankan software. Ini yg dinamakan pre-processing. Fase post-processing biasanya lebih sulit karena pengguna diharapkan bisa menginterpretasi hasil, menganalisis angka dan fisik yang dihasilkan dan melakukan *trouble-shooting* jika hasilnya kurang memuaskan.

2.5.1 Computational Fluids Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan ilmu yang digunakan untuk memprediksi aliran fluida, transfer massa dan panas, dan fenomena lain yang menggunakan persamaan matematika berdasarkan *finite element method* dimana proses perhitungan dan analisa dilakukan dengan menggunakan komputer. CFD menggunakan 5 persamaan dasar yang terdiri dari 1 persamaan energi, 1 persamaan massa dan 3 persamaan momentum. 5 Persamaan dasar ini biasa dikenal dengan persamaan Navier-Stokes. Kelima persamaan tersebut dapat dilihat dalam Persamaan 2.6 hingga Persamaan 2.10 yang penurunannya dapat dilihat pada Lampiran D. Persamaan 2.6 merupakan persamaan kontinuitas. Persamaan 2.7, 2.8 dan 2.9 merupakan persamaan momentum pada arah x,y,z sedangkan Persamaan 2.10 merupakan persamaan energi.

Pada umumnya terdapat tiga tahapan yang harus dilakukan untuk melakukan simulasi CFD yaitu *preprocessing*, *solving*, dan *postprocessing*

Preprocessing merupakan langkah pertama dalam membangun dan menganalisis sebuah model CFD. Teknisnya adalah membuat model dalam CAD (*Computer Aided Design*), membuat sebuah *mesh* yang sesuai kemudian menerapkan kondisi batas dan sifat fluidanya [14]

Solvers (program inti pencari solusi) CFD menghitung kondisi – kondisi yang diterapkan pada saat *preprocessing*. Persamaan – persamaan yang dilibatkan dalam simulasi CFD akan diselesaikan

secara literatif sampai mencapai kondisi konvergen. Tingkat akurasi dari solver ditentukan oleh : tingkat keakuratan dari kondisi batas atau asumsi yang digunakan, *meshing* dan *numerical error* (baik karena keterbatasan *software* atau karena kekeliruan *user software*) [14]

Postprocessing adalah langkah terakhir dalam analisis CFD. Hal yang dilakukan pada langkah ini adalah mengorganisasi dan menginterpretasi data hasil simulasi CFD yang bisa berupa gambar, kurva dan animasi [14].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho f_y$$

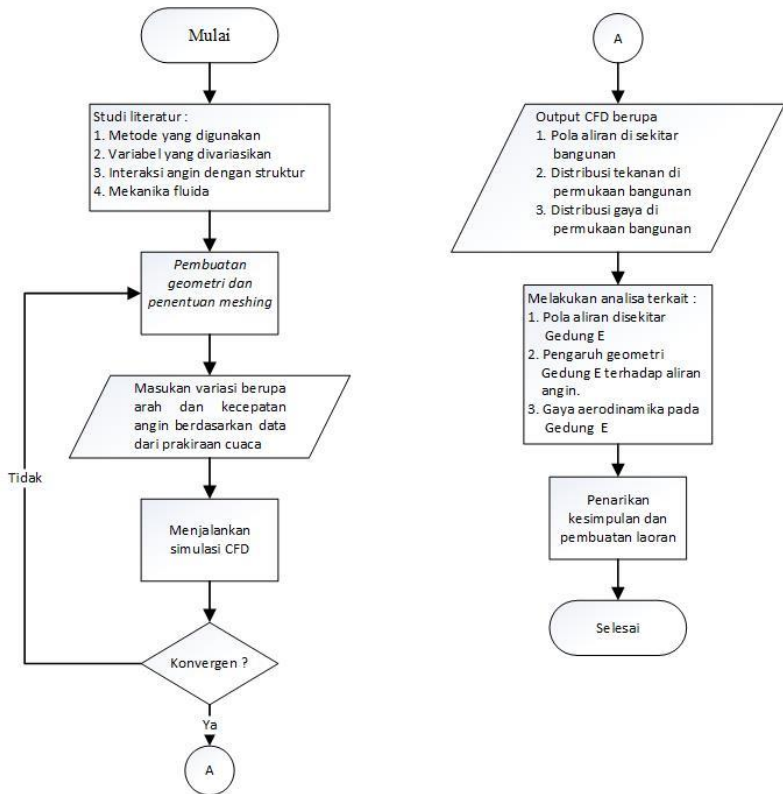
$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = \\ & -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho f_z \\ & \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) = \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(vp)}{\partial y} + \frac{\partial(wp)}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} \\ & + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} \\ & + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho f \cdot V \end{aligned} \quad (2.10)$$

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram alir penelitian

Berikut ini adalah diagram alir yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Pelaksanaan penelitian

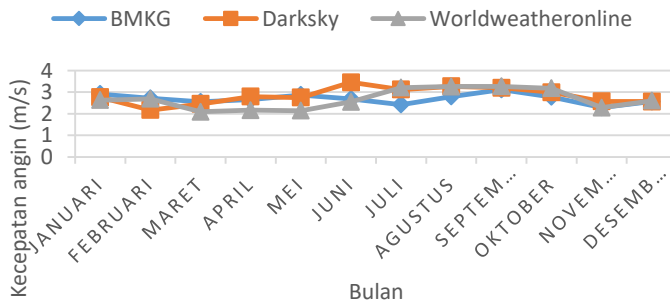
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis numerik dengan memanfaatkan *software* CFD. Mengacu pada diagram alir yang ada pada Gambar 3.1, tahapan yang dilakukan selama penelitian ini adalah sebagai berikut.

3.2.1 Studi literatur

Hal yang pertama dilakukan dalam melakukan penelitian ini adalah studi literatur. Studi literatur ini dilakukan untuk mencari konsep serta teori – teori yang mendukung dan dapat diterapkan dalam penelitian ini. Ilmu yang akan membantu dalam penelitian ini seperti mekanika fluida, aerodinamika, interaksi struktur dan bangunan dan juga komputasi dinamika fluida.

3.2.2 Data arah dan kecepatan angin

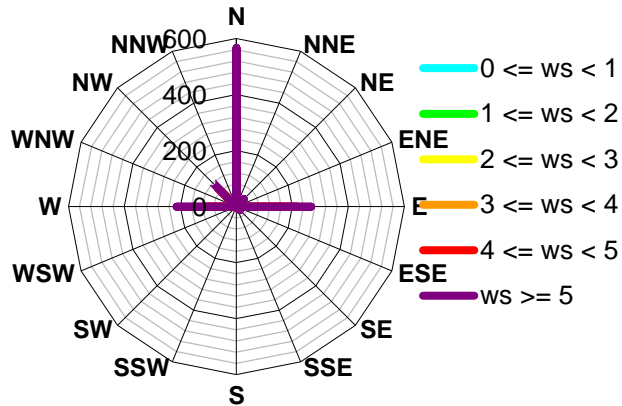
Selain itu, beberapa data yang diperlukan seperti arah dan kecepatan angin di daerah surabaya juga dicari sebagai acuan dalam melakukan variasi simulasi. Data arah dan kecepatan angin didapatkan dari 3 sumber yang berbeda yaitu BMKG, Darksy.net dan worldweatheronline.com. Data arah dan kecepatan angin diambil dalam kurun waktu 3 tahun kebelakang (2015, 2016, 2017) yang kemudian dirata – rata. Data arah dan kecepatan angin yang telah diperoleh dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Data kecepatan angin

Dari data yang tersaji dalam Gambar 3.2 diketahui bahwa kecepatan angin di daerah Surabaya pada kondisi normal berkisar antara 2 – 3 m/s. Simulasi yang akan dilakukan dalam penelitian ini akan difokuskan pada kecepatan tersebut dengan beberapa

tambahan variasi kecepatan yang mungkin terjadi dalam beberapa waktu terakhir.



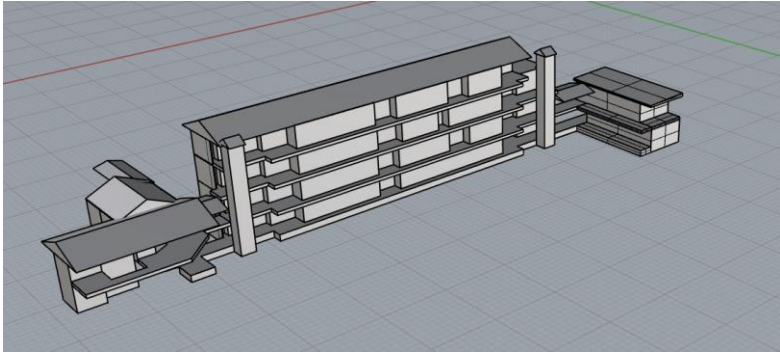
Gambar 3.3 Data arah angin

Gambar 3.3 merupakan distribusi arah dan kecepatan angin di daerah Surabaya pada tahun 2017. Terlihat pada tahun 2017 kecenderungan arah angin lebih banyak bergerak dari arah barat, barat laut, utara dan timur sehingga arah angin yang akan dilakukan untuk simulasi adalah ke empat arah tersebut.

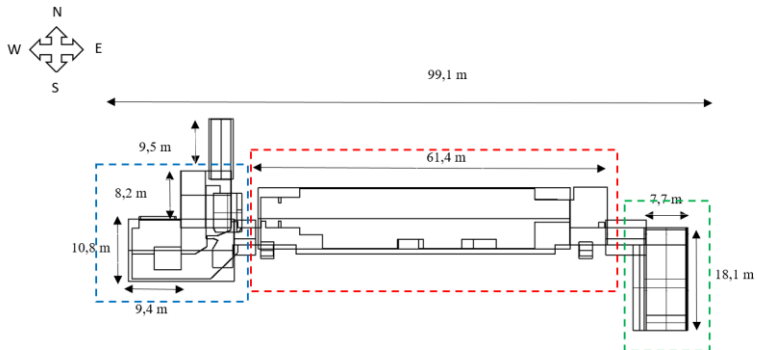
3.2.3 Pembuatan geometri

Geometri yang dimaksud dalam penelitian ini adalah bentuk dari Gedung E yang akan disimulasikan. Pembuatan geometri bangunan uji dilakukan dengan *software design*. Geometri dibuat dengan ukuran yang sama seperti Gedung E sehingga dilakukan pengukuran terlebih dahulu. Pengukuran dilakukan dengan mempertimbangkan bentuk bangunan yang sekiranya dianggap mampu merubah pola aliran angin yang melewatinya. Detail kecil yang kurang mempengaruhi aliran akan diabaikan. Desain bangunan yang dibuat dengan menggunakan *software design* dapat dilihat pada Gambar 3.4. Untuk memudahkan dalam menyebutkan

bagian – bagiannya pada penelitian ini Gedung E dibagi menjadi 3 bagian. Pembagian penamaan Gedung E dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.4 Geometri gedung E

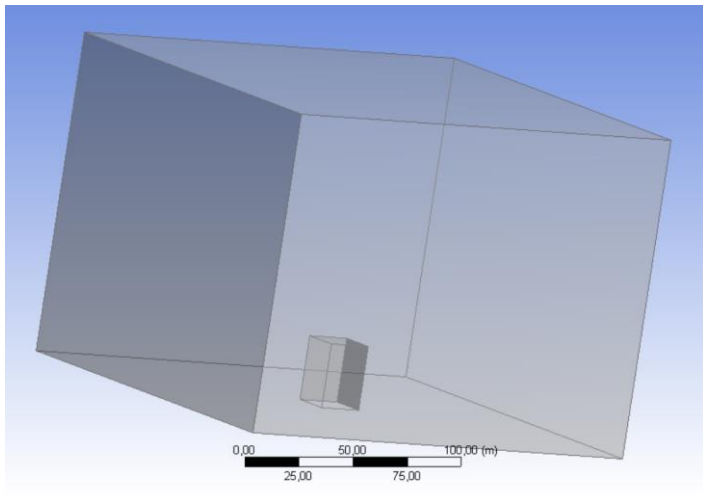


Gambar 3.5 Penamaan geometri Gedung E

Dalam Gambar 3.5 terdapat 3 kotak putus – putus di dalamnya. Gedung dalam kotak merah akan disebut sebagai Gedung E. Gedung dalam kotak hijau di sebelah timur akan disebut sebagai Gedung S2, sedangkan gedung pada kotak biru di sebelah barat akan disebut sebagai Gedung TU.

3.2.4 Penentuan kondisi batas

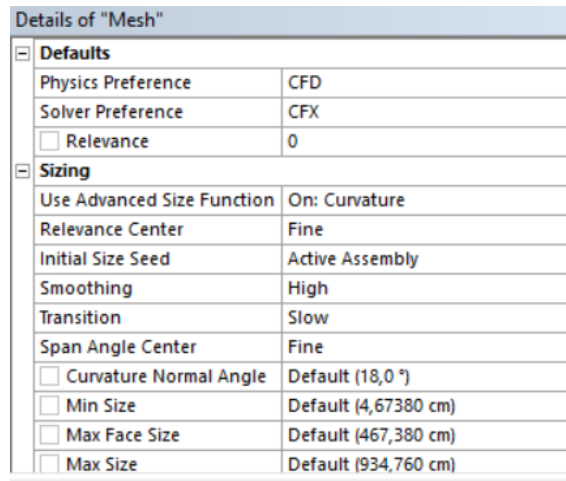
Kondisi batas yang akan digunakan dalam penelitian ini mengacu pada thesis yang ditulis oleh **Guoyi Li** dengan judul *Numerical Simulation of Environmental Flow over Buildings for Renewable Energy Application*. Dalam thesis tersebut penulis menggunakan objek berupa bangunan berukuran 20x20x30 (PxLxT) dengan *enclosure* berukuran (200x200x150).



Gambar 3.6 Geometri untuk validasi

Alasan pemilihan thesis ini sebagai acuan karena *enclosure* yang digunakan tidak memerlukan skala bangunan uji dan variabel yang diamati sama yaitu kecepatan aliran di sekitar bangunan. Desain bangunan untuk mendapatkan kondisi batas dapat dilihat pada Gambar 3.6. Pengaturan untuk mendapatkan kondisi batas disesuaikan dengan acuan. Setelah dilakukan pengaturan sesuai dengan Gambar 3.7, Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 selanjutnya di literasi menggunakan solver dengan batas literasi sebanyak 1000 kali. Hasil dari literasi akan dilihat nilai kecepatan maksimal alirannya dan dibandingkan dengan acuan. Hasil simulasi jurnal acuan menunjukkan bahwa kecepatan aliran angin maksimalnya adalah

6,4 m/s. Setelah dibandingkan, hasil validasi menunjukkan kesalahan sebesar 3,38%. Perbandingan kecepatan aliran dapat dilihat pada Gambar 3.8. Dalam Gambar 3.8 terlihat bahwa penyimpangan antara duplikasi terhadap thesis yang dilakukan tidak memiliki selisih yang besar sehingga kondisi batas yang digunakan dalam thesis tersebut dapat digunakan sebagai kondisi batas dalam penelitian ini.



Gambar 3.7 Visualisasi pengaturan *mesh*

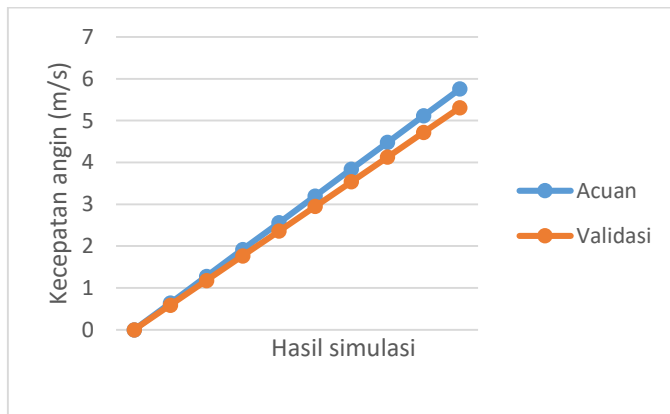
Tabel 3.1 Pengaturan pada *basic setting*

Nama Pengaturan	Pengaturan dipilih	Alasan
<i>Location</i>	<i>Shell</i>	Sesuai nama <i>enclosure</i>
<i>Domain Type</i>	<i>Fluid Domain</i>	Tipe aliran fluida dalam <i>enclosure</i>
<i>Coordinate Frame</i>	Coord 0	Default
<i>Material</i>	Air at 25°C	Jenis fluida yang akan disimulasi
<i>Reference Pressure</i>	1 atm	Sesuai dengan tekanan permukaan bumi

Nama Pengaturan	Pengaturan dipilih	Alasan
<i>Bouyancy Model</i>	<i>Non Bouyant</i>	Tidak ada pengaruh fluida lain dan densitas fluida tetap
<i>Domain Motion</i>	<i>Stationary</i>	Benda diam
<i>Mesh Deformation</i>	<i>None</i>	Mesh tetap

Tabel 3.2 Pengaturan pada *fluids model*

Nama Pengaturan	Pengaturan dipilih	Alasan
<i>Heat Transfer</i>	Isothermal	Suhu fluida yang digunakan
<i>Fluid Temperature</i>	25 °C	Temperatur fluida yang digunakan
<i>Turbulence</i>	k-Epsilon	Model turbulensi sesuai acuan
<i>Wall Function</i>	<i>Scalable</i>	<i>default</i>
<i>Combustion</i>	<i>None</i>	Tidak ada proses pembakaran
<i>Thermal Radiation</i>	<i>None</i>	Tidak diperlukan radiasi termal



Gambar 3.8 Kecepatan aliran acuan vs validasi

A. Uji sensitivitas mesh

Geometri yang akan disimulasikan memiliki ukuran yang besar karenanya dilakukan pula variasi *meshing*. Hasil dari variasi *meshing* dapat dilihat dalam Tabel 3.3. Nilai *error* didapatkan dengan membandingkan kecepatan maksimal yang diperoleh dari hasil simulasi acuan dengan simulasi validasi. Dalam simulasi acuan kecepatan maksimal yang diperoleh adalah 6,4 m/s. Dilihat dari % *error* yang ditunjukkan dalam Tabel 3.3 perubahan mesh tidak menyebabkan perubahan *error* yang signifikan.

Tabel 3.3 Variasi sensitifitas *meshing*

Mesh	<i>Skewness</i>				delta error	% error
	Min	Max	Av	SD		
104218	1.31	0.78	0.23	0.124	0.235	3.83
225536	1.31	0.78	0.23	0.12	0.28	4.56
246337	1.31	0.8	0.23	0.122	0.182	2.96
425133	1.31	0.8	0.22	0.122	0.038	0.62
827086	1.31	0.8	0.22	0.121	0.174	2.83

Dari sisi komputasi semakin banyak mesh akan semakin lama waktu komputasinya. Sehingga penelitian ini akan menggunakan *meshing* sebanyak 104218 dengan *error* sebesar 3,83%.

B. Uji model turbulensi

Selain uji sensitivitas mesh, dilakukan juga pengujian untuk model turbulensinya. Hasil dari simulasi model turbulensi dapat dilihat pada Tabel 3.4

Dilihat dari kecepatan maksimal aliran disekitar udara untuk masing – masing model turbulensi memiliki perubahan yang sedikit, sehingga model turbulensi pada penelitian ini akan mengikuti acuan yaitu model k-epsilon. Selain itu, model k-epsilon juga mampu menampilkan degradasi kecepatan dengan baik. Model k-epsilon juga sudah terbukti handal dan valid untuk melakukan simulasi dengan objek yang besar.

Tabel 3.4 Uji model turbulensi

Model Simulasi	Mesh	Inlet (m/s)	Intensitas Turbulensi Input	Intensitas Turbulensi Output	Kecepatan maksimal (m/s)
Laminar	104218	5	10	5	5.97
k-epsilon	104218	5	10	5	5.905
SST	104218	5	10	5	5.937
BSL Reynold Stress	104218	5	10	5	5.93
SSG Reynold Stress	104218	5	10	5	5.898

(Halaman Ini Sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil simulasi dari ke empat arah

Pada bab ini hasil simulasi yang telah dilakukan akan dibahas dan dianalisa sesuai dengan tujuan dilakukannya penelitian ini.

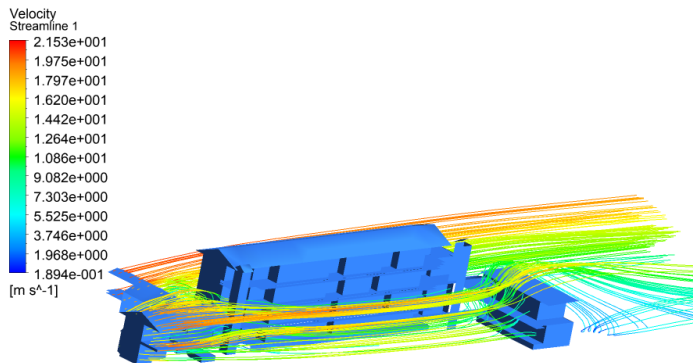
4.1.1 Data hasil arah barat

Berdasarkan data – data yang telah diperoleh pada bab sebelumnya, kemudian dilakukan simulasi. Hasil simulasi yang dilakukan dengan arah angin dari barat dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil simulasi arah barat

Inlet (m/s)	Mesh	Intensitas Turbulensi Inlet	Intensitas Turbulensi Outlet	Kecepatan Max (m/s)	Kecepatan Min (m/s)
1	104218	5	5	1,1	0,018
2	104218	5	5	2,21	0,015
2,2	104218	5	5	2,42	0,018
2,4	104218	5	5	2,66	0,017
2,6	104218	5	5	2,89	0,02
2,8	104218	5	5	3,11	0,022
3	104218	5	5	3,33	0,025
4	104218	5	5	4,44	0,039
5	104218	5	5	5,55	0,051
10	104218	5	5	11,08	0,088
15	104218	5	5	16,62	0,133
19,44	104218	5	5	21,53	0,189

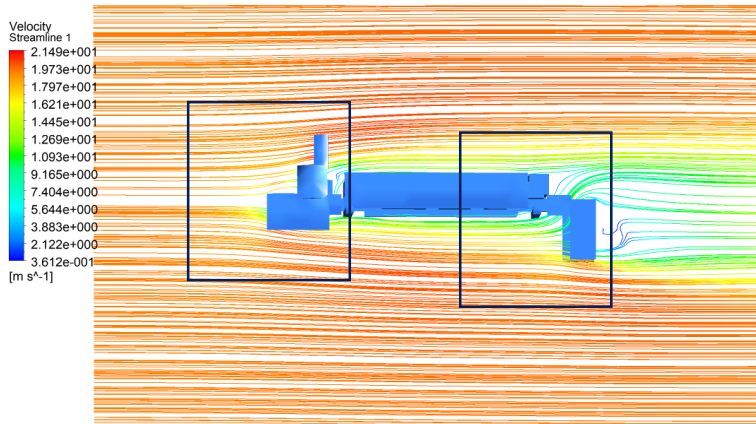
Simulasi yang dianalisa adalah simulasi dengan kecepatan terbesar / kondisi ekstrem dengan kecepatan angin 19,44 m/s. Hasil dari simulasi ini dapat dilihat pada Gambar 4.1.



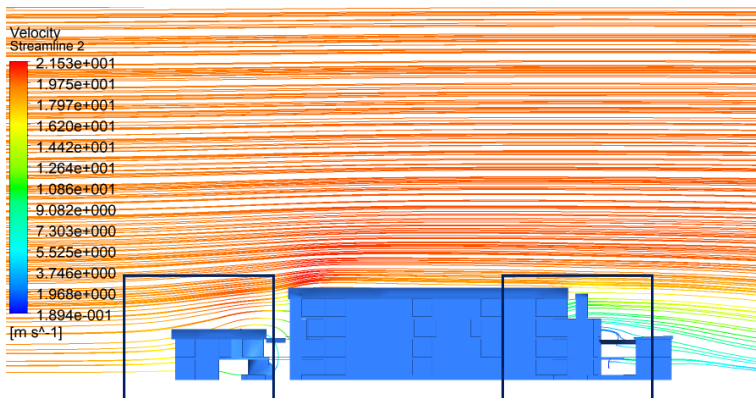
Gambar 4.1 Aliran angin disekitar gedung E

A. Pola aliran

Hasil simulasi pada Gambar 4.1 menunjukkan pola aliran angin unik terjadi karena gedung S2. Pola aliran tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3. Saat angin datang dari arah barat, gedung TU tidak terlalu memberikan dampak yang signifikan pada aliran angin disekitarnya. Gedung TU hanya akan menjadi titik stagnasi dari aliran angin. Keberadaan Gedung TU akan menyebabkan terjadinya separasi aliran angin ke segala arah. Aliran yang terseparasi akan bertemu kembali saat sudah melewati Gedung TU akan tetapi karena keberadaan Gedung E yang lebih tinggi dengan jarak yang dekat membuat aliran *reattach flow* terseparasi ke arah kiri dan kanan Gedung E (Gambar 4.2). Sedikit dari aliran angin yang melewati Gedung TU juga akan membentuk vorteks (Gambar 4.3) seperti yang dijelaskan oleh Holmes [13] Pada Gambar 4.2 secara horizontal dapat dilihat bahwa vorteks yang muncul dibelakang Gedung S2 tidak besar. Hal ini dikarenakan luas permukaan dari Gedung S2 yang relatif kecil juga karena separasi oleh Gedung E yang menyebabkan adanya penurunan kecepatan karena gaya gesek angin dengan gedung tersebut.



Gambar 4.2 Pola aliran arah barat tampak atas



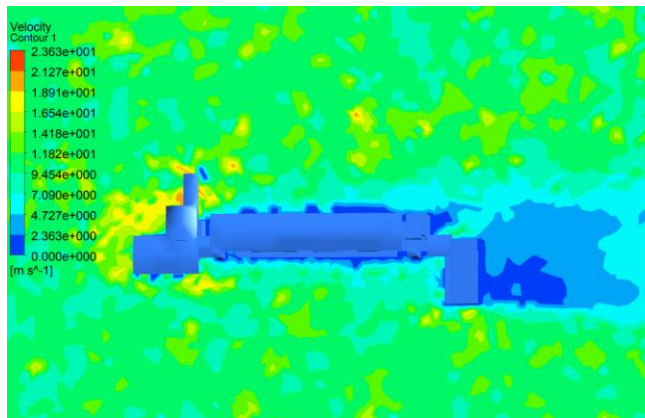
Gambar 4.3 Pola aliran arah barat tampak samping

Pada Gambar 4.3 terlihat adanya vorteks dibelakang Gedung TU. Vorteks ini berasal karena angin yang mengenai Gedung TU akan terseparasi ke segala arah salah satunya menuju atap (*upwind flow*). Gedung TU. Gedung E lebih tinggi dibandingkan dengan Gedung TU sehingga upwind flow tersebut akan langsung

mengarah ke lorong Gedung E dan hanya sedikit saja yang membalik dan membentuk vorteks. Dilihat dari bentuk vorteksnya, vorteks akibat separasi oleh Gedung S2 dan TU termasuk ke dalam jenis *attach vortex*.

B. Distribusi kecepatan

Analisa distribusi kecepatan diperlukan untuk mengetahui interaksi antara kecepatan aliran angin dengan permukaan bangunan. Hasil simulasi distribusi kecepatan secara horizontal dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Distribusi kecepatan arah barat tampak atas

Pada Gambar 4.4 terlihat bahwa terjadi perubahan kecepatan saat aliran angin akan mengenai gedung dan di sepanjang separasi karena gedung. Seperti yang telah di dijelaskan dalam bab 2 bahwa gaya yang terjadi karena interaksi angin dengan adalah berupa tekanan yang ada di permukaan bangunan [2]. Saat aliran angin mengenai permukaan Gedung TU akan terjadi perubahan tekanan di setiap permukaannya. Sebagian tekanan yang dibawa oleh angin akan di tahan oleh material bangunan. Secara fisika aliran angin akan membawa gaya dalam bentuk tekanan. Saat angin mengenai

permukaan bangunan tekanan akan terdistribusi secara tidak merata. Semakin dekat tekanan dengan titik stagnasi (titik dimana kecepatan aliran angin = 0) maka akan semakin banyak yang di hambat oleh bangunan. Semakin menjauhi titik stagnasi tekanan yang diterima oleh bangunan akan berkurang. Penurunan tekanan akan berdampak pada penurunan kecepatan aliran angin.

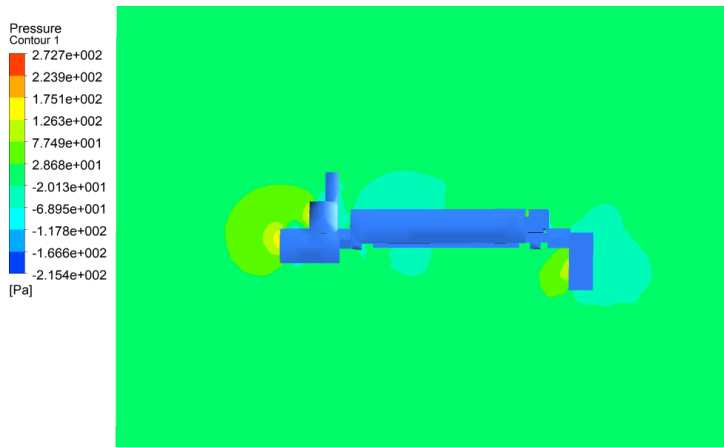
Selain itu faktor yang mempengaruhi terjadi penurunan kecepatan di sepanjang separasi karena adanya gesekan antara aliran udara dengan permukaan bangunan. Angin merupakan fluida yang memiliki viskositas. Viskositas angin akan berubah sesuai dengan temperatur. Kecepatan angin akan berkurang karena adanya gesekan dengan permukaan gedung yang menyebabkan adanya perubahan dari gaya angin (digunakan untuk angin bergerak) menjadi gaya gesek dan panas. Pada Gambar 4.4 juga terlihat adanya penurunan kecepatan sebelum interaksi angin dengan Gedung TU. Ini merupakan efek dari *reverse flow* angin saat terhambat oleh Gedung TU. Kecepatan maksimal aliran angin disekitar Gedung E pada arah ini adalah 16,64 m/s.

C. Distribusi tekanan

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa kecepatan angin akan dipengaruhi oleh distribusi tekanan pada gedung. Selain itu, distribusi tekanan juga akan berhubungan dengan gaya – gaya yang diterima bangunan. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, distribusi tekanan saat arah angin dari barat dapat dilihat pada Gambar 4.4.

Pada Gambar 4.4 terlihat ada beberapa daerah yang mengalami penurunan tekanan yaitu di depan dan belakang Gedung TU dan S2. Penurunan tekanan ini menunjukkan fenomena terbentuknya vorteks. Vorteks terjadi saat tekanan *wind ward* lebih besar daripada *leeward* [2]. Angin cenderung bergerak dari tempat bertekanan tinggi menuju tempat bertekanan rendah [10]. Saat angin terhalang oleh gedung gaya yang dibawa oleh angin akan berupa gaya tekan pada permukaan gedung.

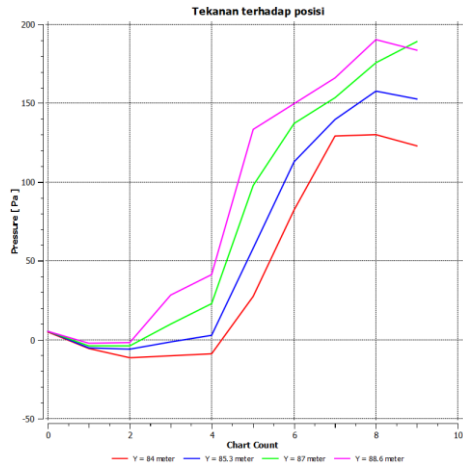
Tekanan yang tinggi di permukaan bangunan akan membuat aliran angin yang terseparasi bergerak menuju ke tempat dengan tekanan yang lebih rendah yaitu di belakang gedung. Geometri dari Gedung TU dan S2 membuat angin yang terseparasi tidak bisa langsung bersatu kembali (*reattach*). Secara teori tekanan terendah akan berada di permukaan belakang bangunan. Angin yang tidak bisa langsung kembali bersatu tadi akan bergerak melingkar untuk menuju ke tekanan terendah yang mengakibatkan terbentuknya pusaran atau biasa disebut vorteks. Koefisien tekanan pada Gedung E adalah 0,972 dengan beda tekanan *windward* dan *leeward* sebesar 488,1 Pa.



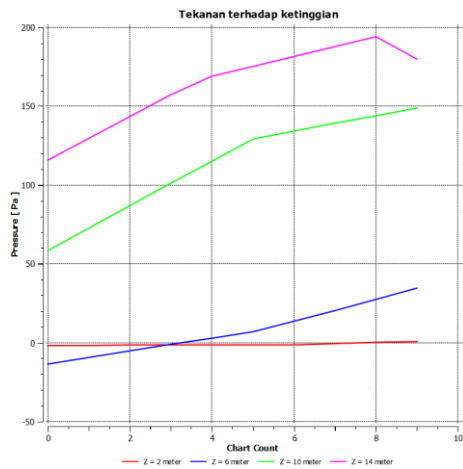
Gambar 4.5 Distribusi tekanan arah barat tampak atas

D. Distribusi gaya aerodinamika

Gaya aerodinamika yang di maksud dalam penelitian ini adalah gaya dorong (*drag*) yang disebabkan oleh kecepatan angin terhadap permukaan gedung. Gaya dorong oleh angin akan sebanding dengan tekanan yang diterima permukaan gedung sesuai dengan definisi tekanan yaitu gaya per satuan luas.



Gambar 4.6 Grafik tekanan terhadap posisi Gedung E dari arah barat



Gambar 4.7 Grafik tekanan terhadap ketinggian Gedung E dari arah barat

Dalam pengujian gaya dorong akan dibuat beberapa sampel garis uji terkait perubahan tekanan terhadap tinggi dan posisi nya. Garis uji yang dibuat selanjutnya dibuat grafik yang dapat dilihat

pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7. Berdasarkan Gambar 4.6 terlihat bahwa gaya dorong angin terbesar berada di dekat lorong antara Gedung E dengan TU. Angin yang terseparasi oleh Gedung TU akan tertahan Gedung E. Keberadaan lorong membuat beda tekanan yang lebih besar dibanding sisi yang lain. Gambar 4.7 menunjukkan bahwa semakin tinggi dari permukaan bumi tekanan akan semakin berkurang. Garis uji warna merah bernilai negatif karena garis tersebut berada di belakang Gedung TU sehingga terkena efek *leeward* Gedung TU. Gaya dorong yang diterima oleh Gedung E sebesar 26500,61 N dengan koefisien *drag* nya sebesar 1.428.

4.1.2 Data hasil arah barat laut

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, didapatkan data seperti yang ditampilkan dalam Tabel 4.2.

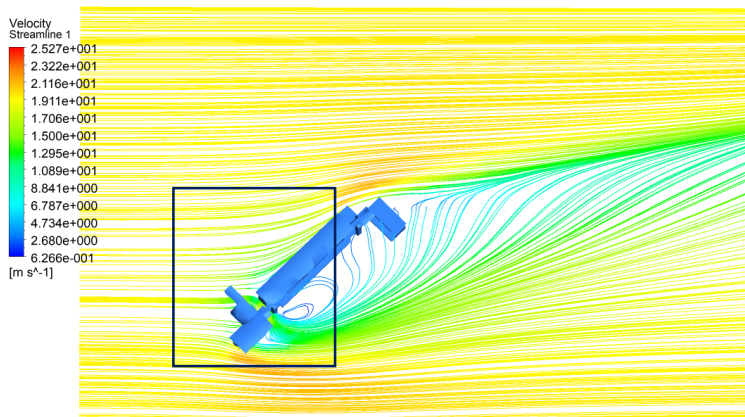
Tabel 4.2 Hasil simulasi arah barat daya

Inlet (m/s)	Mesh	Intensitas Turbulensi Inlet	Intensitas Turbulensi Outlet	Kecepatan Max (m/s)	Kecepatan Min (m/s)
1	104218	5	5	1,25	0,024
2	104218	5	5	2,51	0,059
2,2	104218	5	5	2,76	0,065
2,4	104218	5	5	3,01	0,071
2,6	104218	5	5	3,26	0,078
2,8	104218	5	5	3,51	0,084
3	104218	5	5	3,76	0,090
4	104218	5	5	5,01	0,122
5	104218	5	5	6,26	0,154
10	104218	5	5	12,53	0,311
15	104218	5	5	18,79	0,464
19,44	104218	5	5	24,35	0,60

Sama seperti pada sub bab sebelumnya, simulasi yang digunakan dalam pembahasan ini adalah simulasi dengan kecepatan tertinggi yaitu 19,44 m/s.

A. Pola aliran

Saat angin berasal dari arah barat laut setiap gedung memberikan dampak yang signifikan. Hal ini disebabkan karena angin yang berasal dari arah barat laut akan secara langsung mengenai seluruh permukaan gedung. Oleh karena itu, pola aliran yang dihasilkan lebih kompleks. Pola aliran tersebut dapat dilihat dalam Gambar 4.8 dan Gambar 4.9. Pada Gambar 4.8 terlihat bahwa aliran angin langsung di tahan oleh seluruh gedung.

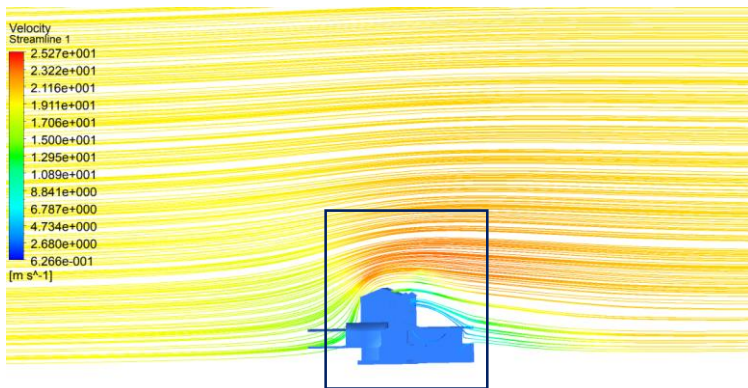


Gambar 4.8 Pola aliran dari arah barat laut tampak atas

Separasi aliran karena Gedung E memberikan dampak terbesar terhadap pola aliran. Gedung TU dan S2 hanya memberikan sedikit percepatan karena *corner* kedua gedung tersebut. Dalam Gambar 4.8 juga terlihat hanya adasatu vorteks yang terbentuk yaitu di belakang Gedung E. Vorteks ini terjadi karena aliran yang melewati lorong antara Gedung E dan TU menuju ke tempat bertekanan rendah di belakang Gedung E.

Dilihat dari pola alirannya, *reattach flow* akan terbentuk jauh di belakang Gedung E.

Jika dilihat tampak samping seperti dalam Gambar 4.9 vorteks yang tercipta hanya berskala kecil. Saat dilihat dari samping, pola aliran lebih dipengaruhi oleh atap. Permukaan atap dan sudut kemiringan atap akan mempengaruhi persebaran tekanan yang diterima oleh gedung. Perubahan tekanan secara tidak langsung akan menyebabkan terjadinya perubahan kecepatan.

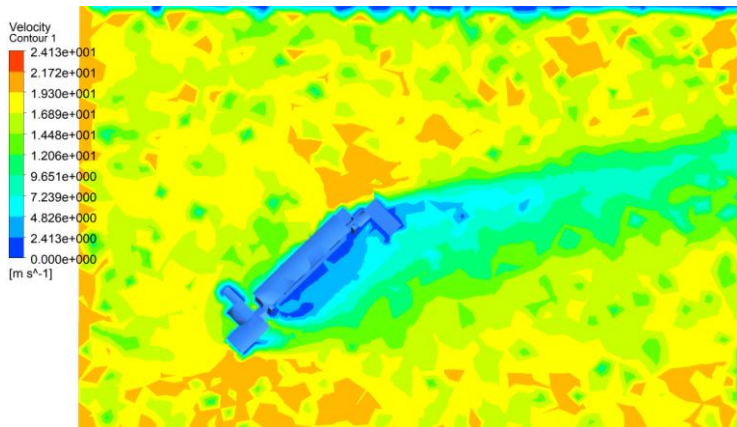


Gambar 4.9 Pola aliran dari arah barat laut tampak samping

B. Distribusi kecepatan

Analisa distribusi kecepatan diperlukan untuk mengetahui interaksi antara kecepatan aliran angin dengan permukaan bangunan. Hasil simulasi distribusi kecepatan secara horizontal dapat dilihat pada Gambar 4.10. Gambar 4.10 menunjukkan pola distribusi di sekitar Gedung E. Aliran angin mengalami penurunan sebelum bertemu dengan gedung, hal ini dikarenakan adanya *reverse flow* oleh angin yang sudah terhalang oleh gedung. Angin yang terhalang oleh gedung akan mengalami penurunan kecepatan di permukaan gedung tersebut. Hal ini dikarenakan energi yang digunakan oleh angin untuk bergerak akan diserap oleh gedung

dalam bentuk tekanan dan di salurkan ke kerangka bangunan dalam bentuk getaran.



Gambar 4.10 Distribusi kecepatan arah barat laut tampak atas

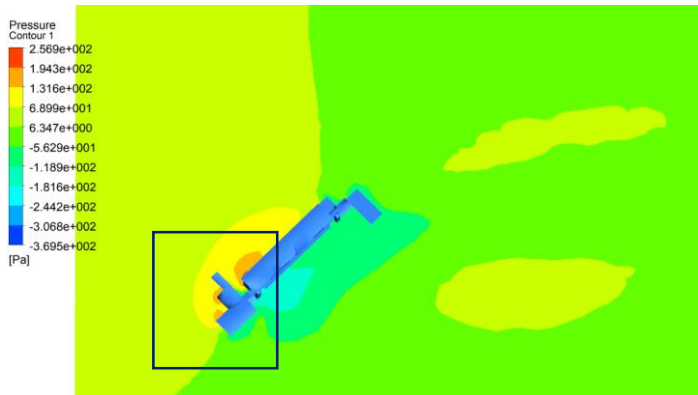
Penurunan kecepatan juga terjadi di belakang gedung. Ini disebabkan karena adanya separasi aliran oleh gedung tersebut. Lebar permukaan Gedung E membuat jarak tempuh untuk terseparasi menuju lorong semakin jauh. Semakin jauh jarak tempuhnya gaya gesek yang menyebabkan penurunan kecepatan angin akan semakin besar. Lorong di antara gedung itu sendiri juga akan menurunkan kecepatan angin tapi tidak sebesar penurunan karena Gedung E. Kecepatan maksimal aliran angin disekitar Gedung E pada arah ini adalah 14,48 m/s.

C. Distribusi tekanan

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa kecepatan angin akan dipengaruhi oleh distribusi tekanan pada gedung. Selain itu, distribusi tekanan juga akan berhubungan dengan gaya – gaya yang diterima bangunan. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, distribusi tekanan saat arah angin dari barat dapat dilihat pada Gambar 4.11. Gambar 4.11 menunjukkan bahwa distribusi

tekanan di permukaan gedung lebih tinggi dibandingkan dengan bagian belakangnya. Perubahan tekanan antara *windward* dan *leeward* inilah yang menyebabkan vorteks terjadi. Tekanan terbesar berada di ujung Gedung E dan TU. Tekanan di kedua tempat lebih besar karena bagian tersebut menahan aliran angin lebih dulu dibandingkan bagian lain.

Selain itu, bagian ujung Gedung TU dan E berbentuk siku – siku yang menyebabkan tekanan akan berkumpul atau tepusat di sudut tersebut. Beda tekanan antara *windward* dan *leeward* Gedung E tidak signifikan, sehingga angin yang bergerak menuju daerah *leeward* tidak banyak (vorteks kecil). Selain karena perubahan tekanan yang kecil, lorong antara Gedung E dan TU juga turut berperan dalam vorteks yang tercipta. Koefisien tekanan pada Gedung E adalah 0.834 dengan beda tekanan *windward* dan *leeward* sebesar 629.2 Pa.

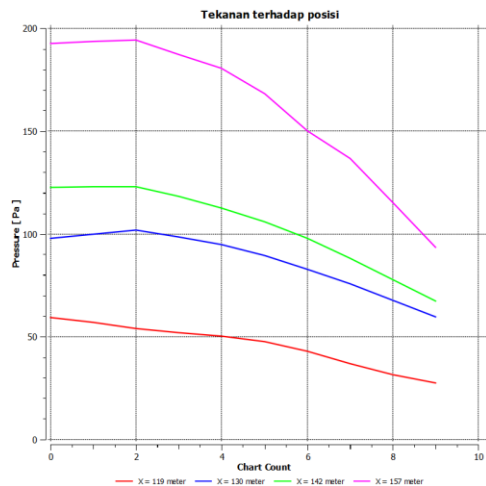


Gambar 4.11 Distribusi tekanan dari arah barat laut tampak atas

D. Distribusi gaya aerodinamika

Gaya aerodinamika yang di maksud dalam penelitian ini adalah gaya dorong (*drag*) yang disebabkan oleh kecepatan angin terhadap permukaan gedung. Gaya dorong oleh angin akan sebanding dengan tekanan yang diterima permukaan gedung sesuai

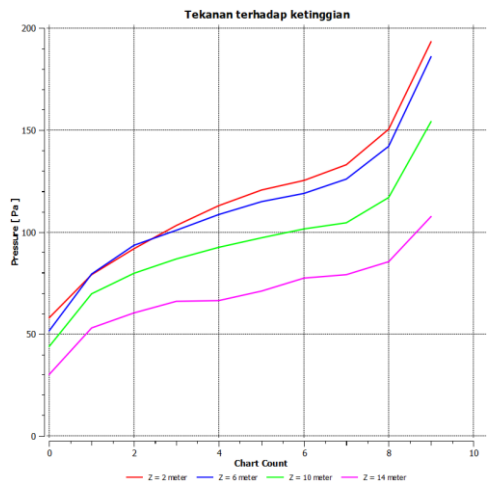
dengan definisi tekanan yaitu gaya per satuan luas. Dalam pengujian gaya dorong akan dibuat beberapa sampel garis uji terkait perubahan tekanan terhadap tinggi dan posisi nya. Garis uji yang dibuat selanjutnya dibuat grafik yang dapat dilihat pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13. Gambar 4.12 menunjukkan perubahan tekanan karena posisi garis uji. Garis warna ungu memiliki gaya dorong paling besar. Hal ini disebabkan karena garis ungu berada paling dekat dengan sumber angin, sehingga terkena aliran angin secara langsung.



Gambar 4.12 Grafik tekanan terhadap posisi Gedung E dari arah barat laut

Gambar 4.13 menunjukkan perubahan tekanan karena ketinggian garis uji. Garis berwarna ungu merupakan garis dengan ketinggian terbesar. Sesuai dengan konsep tekanan dalam atmosfer, semakin tinggi dari permukaan laut maka tekanan nya akan berkurang. Hal yang sama terjadi pada permukaan Gedung E. Secara horizontal semakin tinggi *chart count* pada Gambar 4.13 akan semakin mendekati Gedung TU yang mana bagian ini merupakan bagian pertama terkena tekanan angin secara langsung.

Gaya dorong yang diterima oleh Gedung E sebesar 112.997 N dengan koefisien *drag* nya sebesar 0.789.



Gambar 4.13 Grafik tekanan terhadap ketinggian Gedung E dari arah barat laut

4.1.3 Data hasil arah utara

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, didapatkan data seperti yang ditampilkan dalam Tabel 4.3. Sama seperti pada sub bab sebelumnya, simulasi yang digunakan dalam pembahasan ini adalah simulasi dengan kecepatan tertinggi yaitu 19,44 m/s.

Tabel 4.3 Hasil simulasi arah utara

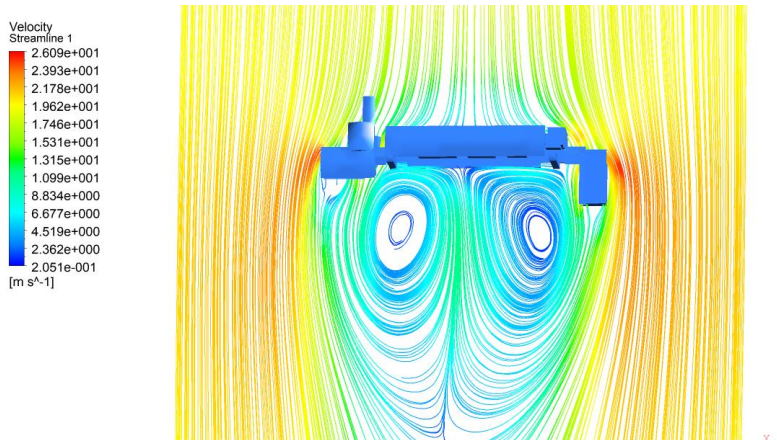
Inlet (m/s)	Mesh	Intensitas Turbulensi Inlet	Intensitas Turbulensi Outlet	Kecepatan Max (m/s)	Kecepatan Min (m/s)
1	104218	5	5	1,32	0,010
2	104218	5	5	2,63	0,031
2,2	104218	5	5	2,90	0,035
2,4	104218	5	5	2,79	0,021

Inlet (m/s)	Mesh	Intensitas Turbulensi Inlet	Intensitas Turbulensi Outlet	Kecepatan Max (m/s)	Kecepatan Min (m/s)
2,6	104218	5	5	3,03	0,025
2,8	104218	5	5	3,69	0,048
3	104218	5	5	3,49	0,028
4	104218	5	5	4,66	0,041
5	104218	5	5	5,82	0,048
10	104218	5	5	11,64	0,080
15	104218	5	5	17,46	0,117
19,44	104218	5	5	22,62	0,150

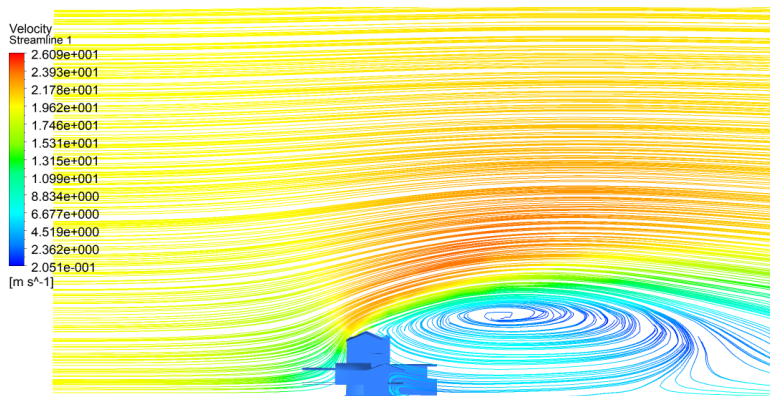
A. Pola aliran

Saat angin berasal dari arah utara setiap gedung memberikan dampak yang signifikan. Hal ini disebabkan karena angin yang berasal dari arah utara akan secara langsung mengenai seluruh permukaan gedung. Oleh karena itu, pola aliran yang dihasilkan lebih kompleks. Pola aliran tersebut dapat dilihat dalam Gambar 4.14 dan Gambar 4.15. Pada Gambar 4.14 terlihat bahwa separasi oleh Gedung E menghasilkan sepasang vorteks dengan diameter yang besar. Hal ini disebabkan karena luas permukaan yang menghalangi aliran angin lebih besar. Separasi aliran terjadi di sepanjang permukaan Gedung E. Lebar dari gedung E membuat jarak yang akan dilewati angin akan semakin panjang. Selain itu karena Gedung E tidak terlalu panjang, saat aliran angin terseparasi oleh gedung tersebut *reattach flow* yang terbentuk akan berada jauh dibelakang gedung tersebut. Selain itu faktor lain yang mempengaruhi vorteks yang terbentuk adalah kemiringan atap.

Kemiringan atap akan menentukan tinggi atau rendahnya vorteks yang terbentuk. Vorteks yang terbentuk karena separasi Gedung E berjenis *reattach vortex*. Vorteks yang dihasilkan saat angin berasal dari arah utara adalah yang paling berbahaya. Melihat dari diameter, panjang dan tingginya vorteks ini memiliki potensi merusak karena menghasilkan hisapan dengan kekuatan yang relatif besar.



Gambar 4.14 Pola aliran dari arah utara tampak atas



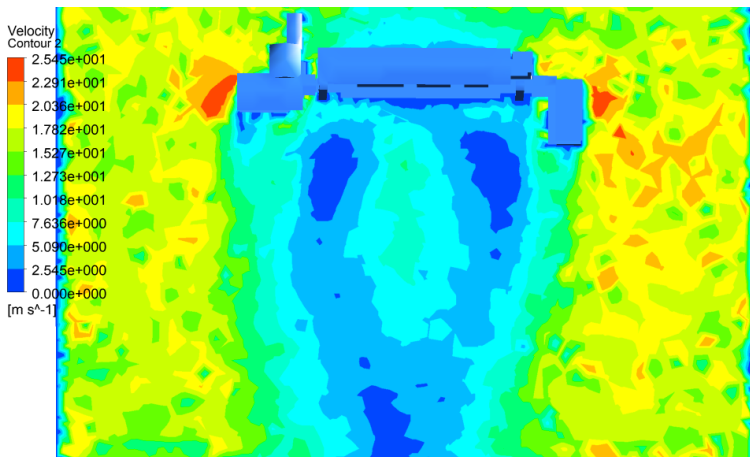
Gambar 4.15 Pola aliran dari arah utara tampak samping

B. Distribusi kecepatan

Setelah dianalisa pola aliran yang terbentuk karena pengaruh Gedung E, selanjutnya dilakukan analisa distribusi kecepatannya. Distribusi kecepatan saat aliran dari arah utara dapat dilihat pada Gambar 4.16. Pada Gambar 4.16 dapat dilihat adanya beberapa perubahan di sekitar Gedung E. Penurunan kecepatan terjadi

sebelum, di permukaan dan belakang Gedung E. Sebagian dari angin yang terhalang oleh Gedung E akan membalik (*reverse flow*) dan berinteraksi dengan aliran angin yang kemudian akan menurunkan kecepatannya. Penurunan kecepatan di permukaan Gedung E karena adanya perubahan tekanan di permukaan gedung. Energi yang dibawa oleh angin untuk bergerak akan berkurang karena tertahan oleh Gedung E.

Dalam Gambar juga terlihat adanya peningkatan di *corner* Gedung TU dan S2. Hal ini terjadi karena *corner* kedua gedung tersebut berbentuk siku – siku sehingga tekanan akan cenderung berpusat ke sudut – sudut tersebut. Penurunan kecepatan di belakang Gedung E disebabkan karena gesekan antara aliran angin dengan gedung. Kecepatan maksimal aliran angin disekitar Gedung E pada arah ini adalah 17,82 m/s.



Gambar 4.16 Distribusi kecepatan dari arah utara tampak atas

C. Distribusi tekanan

Kecepatan angin akan selalu berhubungan dengan distribusinya. Gambar 4.17 merupakan hasil simulasi yang menunjukkan distribusi tekanan di sekitar Gedung E. Dalam

mekanika fluida kecepatan selalu berkaitan dengan tekanan. Jika dilihat Gambar 4.16 dan Gambar 4.17 menunjukkan pola yang hampir sama. Tekanan terbesar akan berada di permukaan Gedung E karena menahan aliran dan sebagai pusat separasi. Semakin mendekati Gedung E tekanan energi yang dibawa oleh angin akan berubah menjadi tekanan di permukaan Gedung E. Sesuai dengan teori pada Gambar terlihat bahwa tekanan *windward* lebih besar dibanding dengan tekanan *leeward*. Hal ini yang membuat vorteks akan tercipta dibelakang gedung.

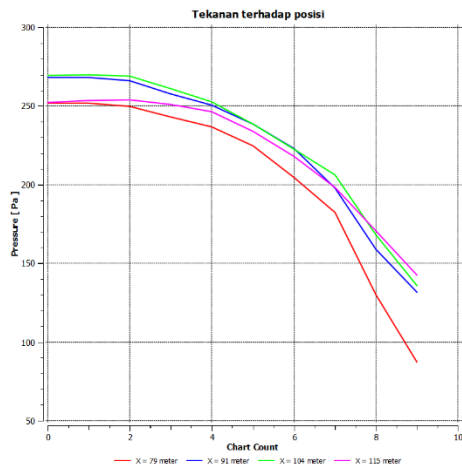


Gambar 4.17 Distribusi tekanan dari arah utara tampak atas

Angin yang terseparasi berada pada daerah bertekanan tinggi. Secara alami angin akan bergerak menuju tempat dengan tekanan yang lebih rendah. Tempat dengan tekanan terendah yang dituju angin adalah pusat dari vorteks yang tercipta. *Reattach flow* akan terbentuk jauh dibelakang Gedung E akan tetapi tekanan terendah berada di titik yang tidak jauh di belakang Gedung E sehingga sebagian akan kembali dan membentuk vorteks. Koefisien tekanan dari Gedung E adalah 0,972 dengan beda tekanan *windward* dan *leeward* sebesar 714 Pa.

D. Distribusi gaya aerodinamika

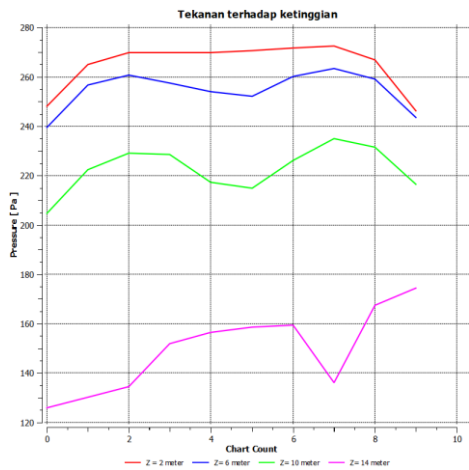
Gaya aerodinamika yang di maksud dalam penelitian ini adalah gaya dorong (*drag*) yang disebabkan oleh kecepatan angin terhadap permukaan gedung. Gaya dorong oleh angin akan sebanding dengan tekanan yang diterima permukaan gedung sesuai dengan definisi tekanan yaitu gaya per satuan luas. Dalam pengujian gaya dorong akan dibuat beberapa sampel garis uji terkait perubahan tekanan terhadap tinggi dan posisi nya. Garis uji yang dibuat selanjutnya dibuat grafik yang dapat dilihat pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19.



Gambar 4.18 Grafik tekanan terhadap posisi Gedung E dari arah utara

Gambar 4.18 menunjukkan adanya penurunan tekanan yang relatif kecil berdasarkan posisinya. Pada arah utara permukaan Gedung E terkena angin secara merata sehingga penurunan tekanan nya tidak banyak. Gambar 4.19 menunjukkan persebaran tekanan yang tidak merata di sepanjang permukaan gedung. Berdasarkan ketinggiannya, tekanan akan berkurang sejalan dengan bertambahnya ketinggian. Persebaran tekanan di permukaan Gedung E juga dipengaruhi oleh tingkat turbulensi

pada lapisan batasnya. Besar gaya dorong pada permukaan Gedung E adalah 229.363,2 N dengan koefisien *drag* nya sebesar 1.747.



Gambar 4.19 Grafik tekanan terhadap ketinggian Gedung E dari arah utara

4.1.4 Data hasil arah timur

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, didapatkan data seperti yang ditampilkan dalam Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil simulasi arah timur

Inlet (m/s)	Mesh	Intensitas Turbulensi Inlet	Intensitas Turbulensi Outlet	Kecepatan Max (m/s)	Kecepatan Min (m/s)
1	104218	5	5	1,16	0,007
2	104218	5	5	2,33	0,016
2,2	104218	5	5	2,56	0,018
2,4	104218	5	5	2	0,039
2,6	104218	5	5	3,42	0,043
2,8	104218	5	5	3,69	0,048
3	104218	5	5	3,95	0,052

Inlet (m/s)	Mesh	Intensitas Turbulensi Inlet	Intensitas Turbulensi Outlet	Kecepatan Max (m/s)	Kecepatan Min (m/s)
4	104218	5	5	5,24	0,038
5	104218	5	5	6,55	0,033
10	104218	5	5	13,08	0,066
15	104218	5	5	19,62	0,128
19,44	104218	5	5	25,42	0,181

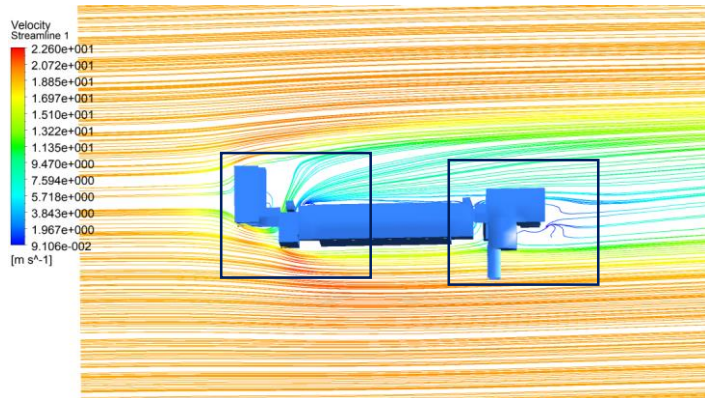
Sama seperti pada sub bab sebelumnya, simulasi yang digunakan dalam pembahasan ini adalah simulasi dengan kecepatan tertinggi yaitu 19,44 m/s.

A. Pola aliran

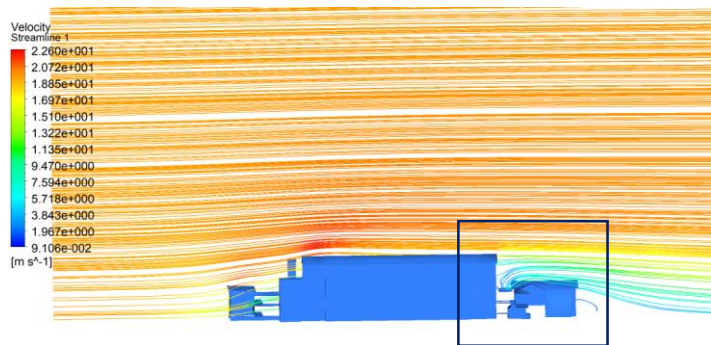
Saat angin berasal dari arah timur Gedung S2 dan TU memberikan dampak yang signifikan. Hal ini disebabkan karena angin yang berasal dari arah timur akan terseparasi oleh Gedung S2 dan Gedung E sehingga pola aliran yang mengenai Gedung TU adalah aliran separasi dari kedua gedung tersebut. Setelah dilakukan simulasi terdapat 2 pola aliran yang hampir sama di belakang Gedung S2 dan TU. Pola aliran di sekitar gedung dapat dilihat pada Gambar 4.20 dan 4.21. Saat angin berasal dari timur separasi akan terjadi karena Gedung S2. Gedung S2 dan Gedung E terhubung oleh lorong yang mana akan menjadi jalur separasi angin dan menimbulkan vorteks didekat Gedung E tetapi tidak semua angin melalui lorong tersebut, sebagian akan menuju ke belakang Gedung S2 dan membentuk vorteks kecil.

Separasi aliran terjadi di sepanjang Gedung E dan tidak mempengaruhi Gedung TU. *Reattach flow* terjadi di belakang Gedung TU sebagai efek dari lorong antara Gedung E dan TU. Lorong tersebut membuat *reattach flow* yang seharusnya berada di belakang Gedung E menjadi di belakang Gedung TU. Sementara jika dilihat pada Gambar 4.21 akan terbentuk aliran yang unik diantara Gedung E dan TU. Angin yang melewati Gedung E

bergerak menuju menuju Gedung E, akan tetapi karena ada lorong dimana tekanan pada lorong tersebut relatif lebih kecil maka sebagian angin akan bergerak menuju lorong tersebut.



Gambar 4.20 Pola aliran dari arah timur tampak atas



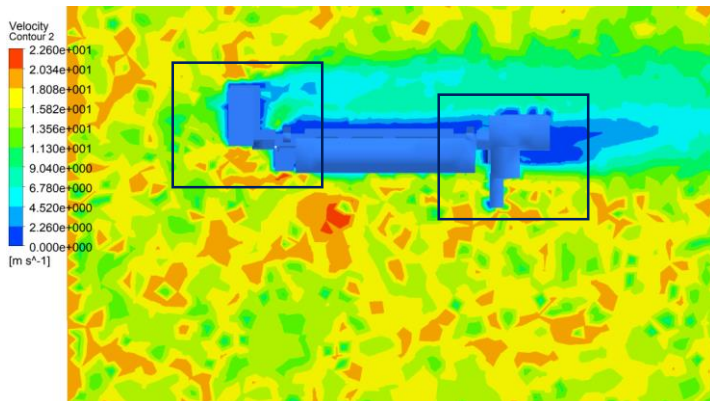
Gambar 4.21 Pola aliran dari arah timur tampak samping

B. Distribusi kecepatan

Selain pola aliran, hal penting yang perlu diperhatikan adalah distribusi kecepatan di sekitar Gedung E. Distribusi kecepatan saat angin berasal dari timur dapat dilihat pada Gambar 4.22. Dalam

Gambar 4.22 terlihat bahwa terjadi penurunan kecepatan di belakang Gedung TU dan S2. Vorteks terjadi di daerah yang telah diberi tanda kotak. Lorong antar gedung membantu separasi aliran menjadi lebih mudah sehingga degradasi penurunan kecepatan tidak terlalu terlihat. Sama seperti sebelumnya, hambatan karena Gedung S2 akan membuat angin mengalami penurunan kecepatan karena adanya perubahan tekanan dan gesekan dengan gedung.

Energi yang digunakan oleh angin untuk bergerak akan diserap oleh gedung dan diteruskan ke kerangka gedung dalam bentuk getaran. Daerah di belakang Gedung S2 merupakan jalur separasi angin sehingga Gedung E akan membantu menurunkan kecepatan pada daerah ini. Kecepatan maksimal aliran angin disekitar Gedung E pada arah ini adalah 16,52 m/s.



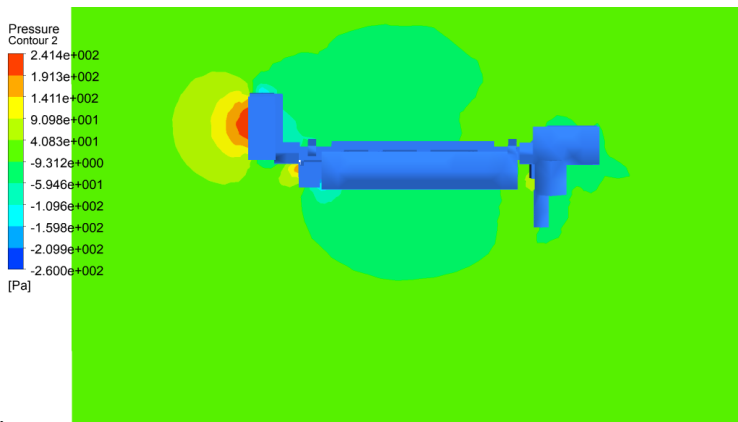
Gambar 4.22 Distribusi kecepatan dari arah timur tampak atas

C. Distribusi tekanan

Distribusi tekanan di sekitar Gedung E dapat dilihat pada Gambar 4.22. Fenomena yang terjadi terkait distribusi tekanan masih sama seperti arah – arah sebelumnya. Tekanan di permukaan Gedung TU lebih besar dibandingkan dengan daerah dibelakang Gedung S2. Unikny saat angin berasal dari timur degradasi penurunan tekanan di belakang Gedung S2 tidak terlalu signifikan.

Penurunan tekanan yang tidak signifikan dibelakang Gedung S2 membuat vorteks tidak terbentuk dalam skala yang besar.

Distribusi tekanan ini menunjukkan bahwa fenomena separasi sangat dominan di sepanjang permukaan Gedung E. Dilihat dari Gambar 4.23 juga terlihat bahwa penurunan tekanan di belakang Gedung TU tidak terlalu terlihat. Selain tidak menciptakan vorteks dalam skala besar hal ini akan menyebabkan *reattach flow* tidak berada jauh dibelakang Gedung TU. Koefisien tekanan pada Gedung E adalah 0,972 dengan beda tekanan *windward* dan *leeward* sebesar 351 Pa.



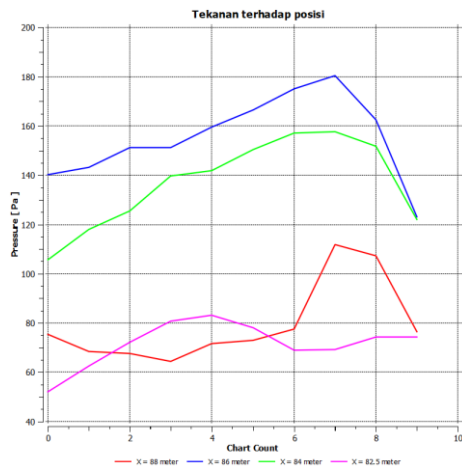
Gambar 4.23 Distribusi tekanan dari timur tampak atas

D. Distribusi gaya aerodinamika

Gaya aerodinamika yang di maksud dalam penelitian ini adalah gaya dorong (*drag*) yang disebabkan oleh kecepatan angin terhadap permukaan gedung. Gaya dorong oleh angin akan sebanding dengan tekanan yang diterima permukaan gedung sesuai dengan definisi tekanan yaitu gaya per satuan luas. Dalam pengujian gaya dorong akan dibuat beberapa sampel garis uji terkait perubahan tekanan terhadap tinggi dan posisi nya. Garis uji

yang dibuat selanjutnya dibuat grafik yang dapat dilihat pada Gambar 4.24 dan Gambar 4.25.

Saat angin berasal dari timur, tekanan yang diterima oleh permukaan Gedung E tidak semuanya berasal dari angin. Sebagian permukaan Gedung E akan menerima tekanan dari separasi aliran oleh Gedung S2. Garis uji warna biru berada pada menerima aliran yang terseparasi oleh *corner* Gedung S2. Separasi karena *corner* yang menyudut akan mengakibatkan kenaikan kecepatan aliran.

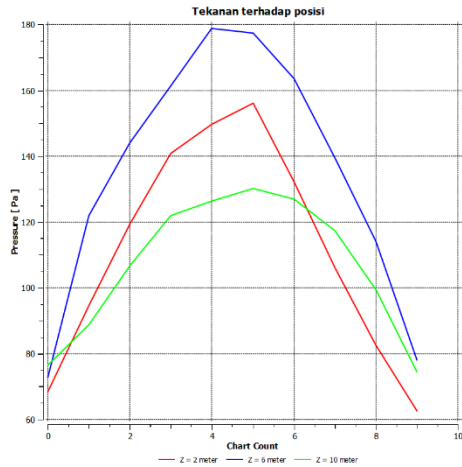


Gambar 4.24 Grafik tekanan terhadap posisi Gedung E dari arah timur

Saat kecepatan angin bertambah maka gaya yang dibawa oleh angin juga bertambah yang secara tidak langsung akan meningkatkan tekanan di permukaan tersebut. *Corner* yang menyudut membuat garis uji biru dan hijau mempunyai tekanan yang lebih besar.

Peak pada Gambar 4.25 merupakan bagian yang terkena separasi *corner* Gedung S2. Garis uji warna biru memiliki tekanan terbesar dikarenakan geometri lantai 2 Gedung S2. Geometri lantai 2 Gedung S2 membuat separasi aliran muncul hanya pada ketinggian yang sama dan menambah tekanan yang diterima di

area tersebut. Gaya dorong yang diterima oleh Gedung E sebesar 2496.38 N dengan koefisien *drag* nya sebesar 0.133.

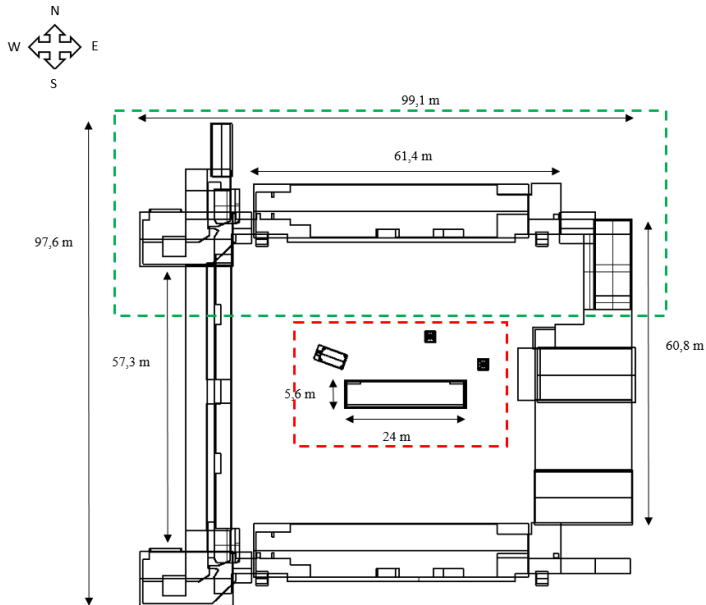


Gambar 4.25 Grafik tekanan terhadap ketinggian Gedung E dari arah timur

4.2 Pola aliran disekitar Gedung E

Setelah dilakukan simulasi berdasarkan 4 arah mata angin, diketahui bahwa dampak terbesar terjadi saat aliran angin berasal dari utara. Untuk itu, dilakukan simulasi tambahan dengan menambahkan bangunan - bangunan di sekitar Gedung E sehingga pola aliran, distribusi kecepatan, distribusi tekanan dan distribusi gayanya dapat mendekati kondisi yang sesungguhnya. Geometri baru yang akan disimulasikan dapat dilihat dalam Gambar 4.26.

Gambar 4.26 merupakan geometri yang telah disesuaikan dengan bangunan di lingkungan Departemen Teknik Fisika ITS dan dilihat dari arah barat. Bagian sebelah kiri merupakan Gedung E sedangkan bagian kanan merupakan bangunan milik Departemen Teknik Mesin.

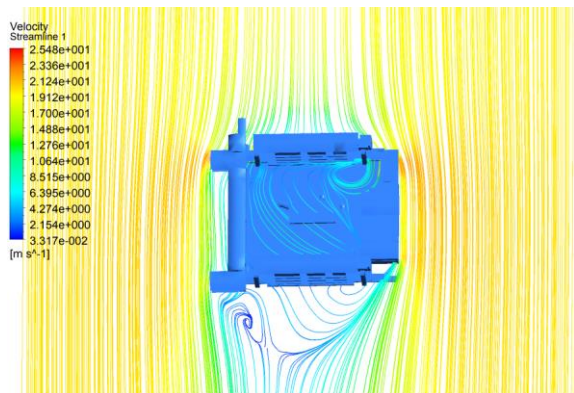


Gambar 4.26 Geometri bangunan di lingkungan Teknik Fisika ITS

4.2.1 Pola aliran

Geometri pada Gambar 4.26 selanjutnya disimulasikan dengan batas kondisi yang disesuaikan dengan simulasi sebelumnya. Hasil dari simulasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.27. Gambar 4.27 berbeda dengan pola aliran karena Gedung E dari arah utara seperti Gambar 4.14. Dalam Gambar 4.27 terlihat bahwa keberadaan bangunan di kanan dan kiri Gedung E membuat aliran tidak bertemu kembali di belakang Gedung E. Sebaliknya, aliran yang terseparasi akan bertemu kembali di belakang Bangunan Teknik Mesin. Jika di perhatikan pola aliran di belakang Gedung Teknik Mesin pun tidak terbentuk 2 vorteks seperti pada Gambar 4.14. Hal ini terjadi karena bagian *windward* Gedung Teknik Mesin tidak mendapat tekanan sebanyak *windward* Gedung E.

Perubahan tekanan pada bagian *windward* dan *leeward* tersebut akan mempengaruhi daya hisap vorteks yang terbentuk. Selain itu, Gedung Teknik Mesin tidak menerima tekanan dari angin secara langsung, melainkan hanya menerima tekanan angin hasil separasi karena Gedung E yang bergerak melalui lorong – lorongnya. Vorteks yang muncul dibelakang di dekat Gedung S2 terjadi karena di bagian itu separasi terjadi karena Gedung E dan S2 sehingga perubahan tekanan yang terjadi cukup besar untuk menghasilkan vorteks.

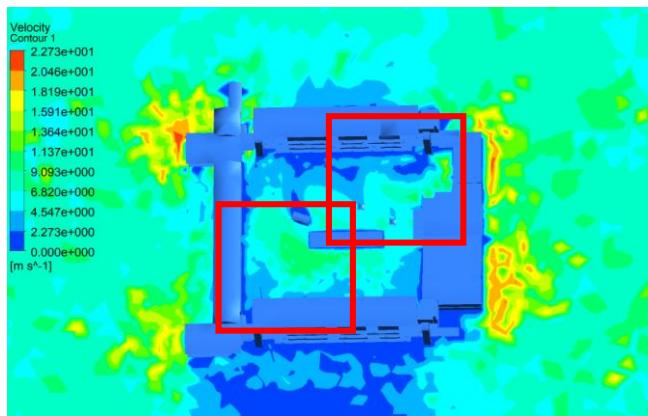


Gambar 4.27 Pola aliran di lingkungan Teknik Fisika

4.2.2 Distribusi kecepatan

Setelah dianalisa pola aliran yang terbentuk, selanjutnya dilakukan analisa terkait distribusi kecepatan disekitar bangunannya. Distribusi kecepatan yang didapatkan dari hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.28. Gambar 4.28 diambil pada ketinggian 2 meter diatas permukaan tanah. Pada ketinggian 2 meter seluruh pola aliran karena bangunan – bangunan di antara Teknik Fisika dan Teknik Mesin akan terlihat. Gambar 4.28 menunjukkan bahwa kecepatan diantara kedua gedung tersebut relatif tinggi yaitu 13,64 m/s. Gambar 4.28 menunjukkan kecepatan terbesar berada di belakang Kantin. Kecepatan di

belakang Kantin lebih besar karena adanya efek *corner* bangunan tersebut. Tekanan cenderung menuju ke *corner* bangunan. Tekanan yang lebih pada *corner* bangunan akan diserap oleh angin dan diubah menjadi energi kinetik. Selain itu kecepatan angin relatif tinggi di belakang Gedung E di dekat S2. Hal ini karena angin yang melewati daerah tersebut adalah angin hasil separasi Gedung E dan S2. Kecepatan maksimal aliran angin disekitar Gedung E pada arah ini adalah 13,64 m/s.

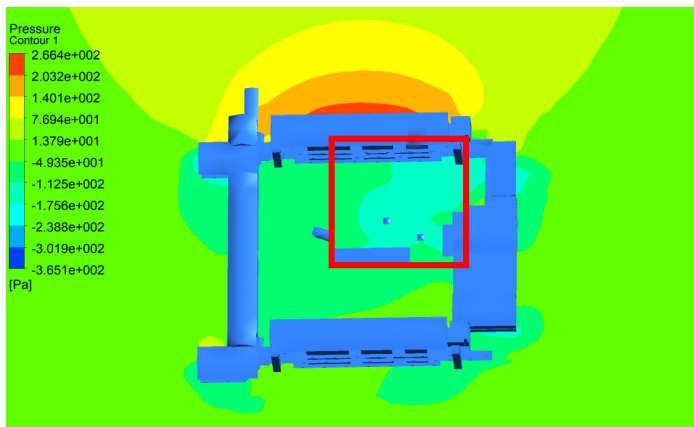


Gambar 4.28 Distribusi kecepatan di lingkungan Teknik Fisika

4.3 Pengaruh keberadaan Gedung E

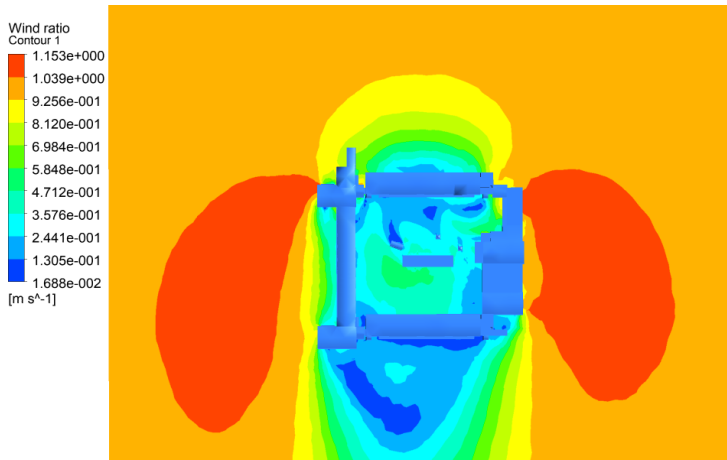
Selanjutnya hasil simulasi yang dianalisis adalah distribusi tekanannya. Distribusi tekanan dapat dilihat pada Gambar 4.29. Pada Gambar 4.29 terlihat bahwa tekanan di bagian *windward* Gedung E lebih besar dibandingkan dengan bagian *leeward* nya. Dalam kotak merah yang terlihat dalam Gambar 4.29 merupakan daerah dengan tekanan terendah. Hal ini disebabkan karena angin mengenai permukaan Gedung E dan juga permukaan sisi Gedung S2. Posisi Gedung S2 yang sedikit di belakang Gedung E menyebabkan adanya celah yang menimbulkan hisapan (*suction*) terhadap angin.

Celah ini membuat tekanan negatif tidak hanya muncul di belakang Gedung E saja tapi juga di sisi Gedung S2. Gabungan dari kedua tekanan negatif tersebut membuat perubahan tekanan yang cukup untuk menciptakan vorteks. Selain di bagian tersebut distribusi tekanan di lingkungan Teknik Fisika tersebar secara merata. Besar koefisien tekanan pada Gedung E sebesar 0,989 dengan beda tekanan *windward* dan *leeward* sebesar 442 Pa. Gambar 4.30 merupakan distribusi dari rasio angin di lingkungan Teknik Fisika. Mengacu pada penelitian yang telah dilakukan oleh Tse [7] nilai dari rasio angin (K) akan digunakan untuk mengklasifikasikan daerah persebaran angin.



Gambar 4.29 Distribusi tekanan di lingkungan Teknik Fisika

Dalam penelitian ini daerah persebaran angin akan di klasifikasikan menjadi 3 yaitu, *low wind speed*, *high wind speed* dan *corner stream*. Tse [7] menyebutkan bahwa saat nilai $K < 0,7$ berarti keberadaan bangunan berhasil menurunkan kecepatan angin sebesar 30%. Kebalikannya jika nilai $K > 1,3$ maka angin mengalami percepatan sebanyak 30%. Dalam Gambar 4.30 terlihat bahwa Gedung E mampu menurunkan kecepatan udara untuk daerah disekitarnya.



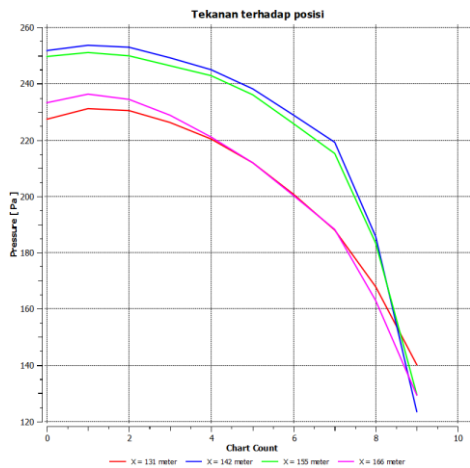
Gambar 4.30 Kontur rasio angin

4.4 Gaya aerodinamika pada Gedung E

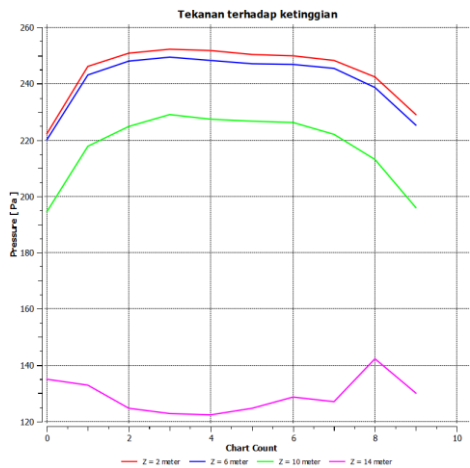
Gaya aerodinamika yang di maksud dalam penelitian ini adalah gaya dorong (*drag*) yang disebabkan oleh kecepatan angin terhadap permukaan gedung. Gaya dorong oleh angin akan sebanding dengan tekanan yang diterima permukaan gedung sesuai dengan definisi tekanan yaitu gaya per satuan luas. Dalam pengujian gaya dorong akan dibuat beberapa sampel garis uji terkait perubahan tekanan terhadap tinggi dan posisi nya.

Garis uji yang dibuat selanjutnya dibuat grafik yang dapat dilihat pada Gambar 4.31 dan Gambar 4.32. Gambar 4.31 menunjukkan adanya penurunan tekanan yang relatif kecil berdasarkan posisinya. Pada arah utara permukaan Gedung E terkena angin secara merata sehingga penurunan tekanan nya tidak banyak. Gambar 4.32 menunjukkan persebaran tekanan yang cukup merata di sepanjang permukaan gedung. Berdasarkan ketinggiannya, tekanan akan berkurang sejalan dengan bertambahnya ketinggian. Persebaran tekanan di permukaan

Gedung E juga dipengaruhi oleh tingkat turbulensi pada lapisan batasnya.



Gambar 4.31 Grafik tekanan terhadap posisi Gedung E



Gambar 4.32 Grafik tekanan terhadap ketinggian Gedung E

Dari Gambar 4.32 juga menunjukkan bahwa semakin tinggi maka tekanan semakin rendah yang berarti kecepatan anginnya semakin bertambah. Besar gaya dorong pada permukaan Gedung E adalah 215001,6 N dengan koefisien *drag* nya sebesar 2,031.

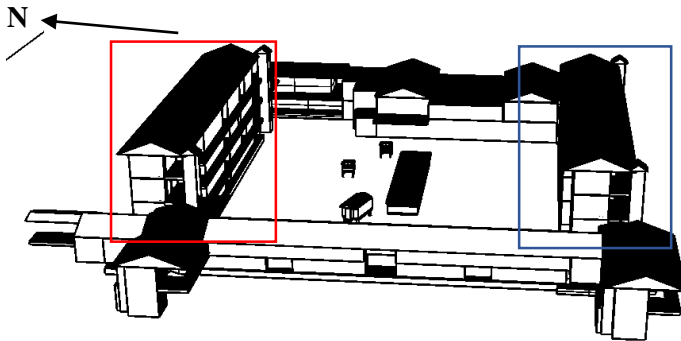
4.5 Pengaruh Gedung E terhadap lingkungan

Seperti yang telah dijelaskan pada Sub Bab 4.2 dan 4.3 bahwa keberadaan Gedung E membuat distribusi tekanan di area belakang Gedung E menjadi lebih merata. Jika dibandingkan dengan hasil simulasi dari arah utara, keberadaan bangunan di sekitar Teknik Fisika dapat menghilangkan sepasang vorteks yang seharusnya terbentuk di belakang Gedung E. Sekarang ini, di sebelah selatan Gedung E terdapat 4 pohon yang berukuran cukup besar. Menurut Tom Lawson [10] untuk mengetahui respon lingkungan terhadap angin dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu menggunakan skala Beaufort dan reaksi manusianya. Jika dilihat pada Gambar 3.28 daerah di belakang Gedung E memiliki rata – rata kecepatan angin sebesar 4,4 m/s.

Menurut skala Beaufort angin dengan kecepatan 4,5 m/s tidak mampu untuk mematahkan sebuah pohon dengan ukuran sedang. Akan tetapi ketinggian pohon terhadap Gedung E juga akan berpengaruh. Jika keempat pohon ini lebih tinggi dibanding Gedung E besar kemungkinan bagian pohon yang melebihi Gedung E akan patah. Hal ini disebabkan karena bagian pohon yang melebihi tinggi Gedung E akan terkena percepatan aliran angin sebagai efek dari separasi oleh atap Gedung E. Untuk memperjelas visualisasi dari lingkungan Teknik Fisika dapat dilihat pada Gambar 4.33.

Daerah – daerah yang rawan bahaya jika angin dengan kecepatan 19.44 m/s melanda kawasan Teknik Fisika adalah di sebelah utara Gedung E (kotak merah) dan Gedung C (kotak biru). Hal ini disebabkan karena pada kedua daerah ini kecepatan angin masih cukup tinggi yaitu berkisar antara 11 – 13 m/s. Pada kecepatan 11 – 13 m/s angin akan mampu untuk mengerakkan batang pohon dengan ukuran sedang. Jika dilihat dari rasio angin

pada Gambar 4.30 kedua daerah tersebut berada pada rasio angin 0,9 yang menandakan bahwa penurunan kecepatan aliran angin karena Gedung E dan Gedung C kurang dari 30%.



Gambar 4.33 Bangunan di Departemen Teknik Fisika

Setelah dilakukan simulasi berdasarkan 4 arah angin yang sering terjadi di Surabaya dapat disimpulkan bahwa arah angin barat dan timur memiliki tingkat bahaya terendah untuk manusia di sekitarnya. Pada kedua arah tersebut Gedung E tidak menerima beban angin secara langsung. Gedung E akan menjadi jalur separasi aliran yang sebelumnya telah mengenai permukaan Gedung TU atau S2. Luas permukaan Gedung TU dan S2 relatif lebih kecil dibandingkan dengan Gedung E sehingga vorteks yang dihasilkan tidak memiliki daya hisap yang besar. Kecepatan terbesar disekitar Gedung E pada kedua arah ini masing – masing 16,64 m/s pada arah barat dan 16,52 pada arah timur. Jika dibawa ke skala Beaufort kedua kecepatan ini masuk ke dalam kategori *high wind*, *moderate gale*, *near gale* yang dalam ciri fisiknya aliran angin memiliki kekuatan yang cukup untuk mengerakkan seluruh pohon.

Pada arah barat laut, beban angin diterima oleh permukaan Gedung E dan sebagian permukaan Gedung TU dan S2. Luasan yang menerima beban angin dari arah ini adalah yang paling luas, sehingga gaya dorong yang dihasilkan juga paling besar. Lorong yang menghubungkan tiap gedung membantu memandu angin yang terseparasi. Selain itu karena sudut penerimaan beban angin juga membantu dalam mengurangi diameter vorteks. Kecepatan terbesar di sekitar Gedung E pada arah ini adalah 14,48 m/s. Dalam skala Beaufort kecepatan ini masuk ke dalam kategori *high wind*, *moderate gale*, *near gale* yang dalam ciri fisiknya aliran angin memiliki kekuatan yang cukup untuk mengerakkan seluruh pohon.

Pengaruh angin terhadap Departemen Teknik Fisika ITS paling bahaya saat angin berasal dari arah utara. Saat angin berasal dari arah utara, beban angin akan diterima oleh Gedung E. Gedung E merupakan gedung dengan luas permukaan terbesar yaitu 880 m². Saat angin berasal dari arah utara, Gedung E akan menyebabkan separasi. Separasi karena Gedung E akan menghasilkan vorteks dengan diameter yang besar. Perubahan tekanan dari *windward* dan *leeward* yang cukup besar membuat angin yang seharusnya bertemu jauh dibelakang Gedung E akan berbalik karena tekanan yang rendah. Titik dibelakang Gedung E yang mempunyai tekanan terendah akan menjadi pusat vorteks. Semakin menuju pusat vorteks kecepatan angin akan semakin meningkat. Pusaran angin yang terbentuk akan memiliki kekuatan untuk menarik / menghisap benda – benda disekitarnya yang mana akan menimbulkan bahaya bagi lingkungannya. Kecepatan terbesar di sekitar Gedung E pada arah ini adalah 17,82 m/s yang jika dibawa ke skala Beaufort akan masuk kedalam kategori *Gale*. Secara fisik pada kategori *Gale* aliran angin akan mampu mematahkan pepohonan yang dilaluinya.

Saat simulasi dibuat mendekati kondisi aslinya dengan menambahkan bangunan – bangunan disekitar Gedung E pola aliran yang terbentuk tidak seekstrem simulasi Gedung E dari arah utara. Penambahan bangunan di sekitar Gedung E membuat daerah di belakang Gedung E memiliki daerah persebaran tekanan

leeward yang lebih besar. Pada kondisi ini aliran angin tidak terpusat ke satu bagian saja melainkan hampir merata ke seluruh bagian. Selain itu bangunan di sisi kanan dan kiri Gedung E membuat separasi aliran dan menghalangi *reattach flow* yang seharusnya berada di belakang Gedung E (simulasi arah utara). Kedua alasan inilah yang menyebabkan tidak munculnya vorteks seperti pada simulasi dari arah utara yang sebelumnya. Kecepatan terbesar di sekitar Gedung E pada simulasi ini adalah 13,64 m/s. Dalam skala Beaufort kecepatan ini masuk ke dalam kategori *strong breeze* yang dalam ciri fisiknya aliran angin mampu menggerakkan batang sebuah pohon.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian ini di dapatkan beberapa kesimpulan yang diambil dari simulasi berdasarkan geometri di lingkungan Teknik Fisika secara lengkap dan arah terekstrem yaitu :

1. Sepasang vorteks yang muncul di belakang Gedung E karena separasi aliran menghilangkan karena keberadaan bangunan di sebelah timur dan barat gedung tersebut.
2. Keberadaan Gedung E mampu menurunkan kecepatan aliran angin sebesar 30% sehingga daerah di belakang Gedung E cenderung aman.
3. Gaya dorong yang diterima oleh Gedung E saat angin berasal dari utara adalah 215001,6 N dengan koefisien gaya *drag* sebesar 2,031.
4. Berdasarkan simulasi pada kondisi ekstrem yang telah dilakukan, diketahui bahwa daerah rawan bahaya di lingkungan Teknik Fisika berada di belakang Gedung E dan di depan Gedung C. Sehingga, direkomendasikan untuk tidak menanam pohon dengan ketinggian melebihi kedua gedung tersebut dan juga dilakukan pemangkasan berkala untuk pohon yang berukuran besar.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang diberikan setelah dilakukan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Melakukan perhitungan turbulensi akibat gedung kimia sehingga lebih sesuai dengan kondisi nyata.
2. Membahas tentang interaksi angin dengan struktur bangunan.

(Halaman Ini Sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Silver, *Global Warming & Climate Change*, New Jersey: The McGraw-Hill Companies, 2008.
- [2] S. Ghosh, *Seismic and Wind Design of Concrete Buildings*, United States: Country Club Hills, 2003.
- [3] G. Li, "Wind-induced Interference Effects on Low-rise Buildings with Gable Roof," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 94-106, 2017.
- [4] G. A. Kopp, "Full-scale Testing of Low-rise, Residential Buildings with Realistic Wind Load," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 25-39, 2012.
- [5] J. Song, "Aerodynamics of Closely Spaced Buildings: with Application to Linked Buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 1-16, 2016.
- [6] W. Yuan, "Numerical Analyses of Aerodynamic Characteristic of Integrated L-shaped High-rise Building," *Advances in Engineering Software*, pp. 144-153, 2017.
- [7] K. Tse, "Pedestrian-level Wind Environment Around Isolated Buildings Under The Influence of Twisted Wind Flows," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 12-23, 2017.
- [8] D. N. Wirastuti Widyatmanti, *Geografi*, Jakarta: Grasindo, 2006.
- [9] B. Utoyo, *Geografi : Membuka Cakrawala Dunia*, Bandung: Setia Purna Inves, 2007.
- [10] T. Lawson, *Building Aerodynamics*, United States: Imperial College Press, 2001.
- [11] R. H. S. Emil Simiu, *Wind Effect on Structure : Fundamentals and Application to Design*, New York: John Wiley & Sons, 1996.

- [12] N. B. M. Noor, Analysis of Vortex Shedding in a Various Body Shapes, Johor: Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, 2015.
- [13] J. D. Holmes, Wind Loading of Structures, New York: Spon Press, 2001.
- [14] F. Tuakia, Dasar - Dasar CFD Menggunakan Fluent, Bandung: Informatika, 2008.
- [15] D. V. Hutton, Fundamentals Of Finite Element, McGraw Hill, 2004.
- [16] Y. Susatio, Dasar - Dasar Metode Elemen Hingga, Yogyakarta: ANDI, 2004.
- [17] G. Li, "Numerical Simulation of Environmental Flow over Buildings for Renewable Energy Application," Arizona State University, Arizona, 2015.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Indra Wijaya. Penulis lahir di Bantul, 20 Juni 1995. Penulis menempuh pendidikan formal di SD N Timuran Yogyakarta pada tahun 2001. Setelah lulus SD, penulis melanjutkan studinya di SMP N 3 Yogyakarta pada tahun 2007. Pada tahun 2010 penulis melanjutkan pendidikan di SMA N 1 Sewon Bantul. Selanjutnya pada tahun 2013 penulis melanjutkan studi di Program Studi Diploma III Elektronika dan Instrumentasi di UGM. Penulis menempuh studi Diploma III selama 2 tahun 6 bulan dan lulus pada tahun 2016. Pada tahun yang sama penulis memilih untuk melanjutkan studi Strata 1 di Departemen Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik pada alamat eoyore_10@yahoo.com.

LAMPIRAN

LAMPIRAN A

PERHITUNGAN PARAMETER SIMULASI

Tabel A.1 Perhitungan intensitas turbulensi

Densitas (kg/m ³)	Viskositas (Ns/m ²)	Diameter (m)	Kecepatan angin (m/s)	Bilangan Reynolds	Intensitas turbulensi
1,293	0,001	28,28	1	36566,04	4,588121104
1,293	0,001	28,28	2	73132,08	4,207325603
1,293	0,001	28,28	2,2	80445,288	4,15749789
1,293	0,001	28,28	2,4	87758,496	4,112524208
1,293	0,001	28,28	2,6	95071,704	4,071582172
1,293	0,001	28,28	2,8	102384,912	4,034039243
1,293	0,001	28,28	3	109698,12	3,999398835
1,293	0,001	28,28	4	146264,16	3,858134589
1,293	0,001	28,28	5	182830,2	3,752006846
1,293	0,001	28,28	10	365660,4	3,440605448
1,293	0,001	28,28	15	548490,6	3,270570124
1,293	0,001	28,28	19,44	710843,8176	3,166269227

LAMPIRAN B

PERHITUNGAN KOEFISIEN GAYA DAN TEKANAN

Tabel B.1 Perhitungan koefisien tekanan barat

U_0 (m/s)	U_b (m/s)	U (m/s)	P (Pa)	ΔP (Pa)	C_p
0,66	0,22	0,11	0,405	1,3	0,972
1,33	0,44	0,22	1,62	4,66	0,973
1,46	0,49	0,24	1,96	6,25	0,973
1,59	0,53	0,27	2,33	7,45	0,971
1,73	0,58	0,29	2,74	8,74	0,972
1,86	0,62	0,31	3,18	10,13	0,972
1,99	0,66	0,33	3,65	11,64	0,973
2,65	0,88	0,44	6,49	20,68	0,972
3,32	1,12	0,55	10,14	32,31	0,973
6,63	2,21	1,11	40,57	129,2	0,972
9,95	3,32	1,66	91,3	290,6	0,972
12,89	4,3	2,15	153,36	488,1	0,972

Tabel B.2 Perhitungan koefisien gaya barat

ρ (kg/m ³)	A (m ²)	F (N)	C_d
1,2	172,8	69,984	1,438
1,2	172,8	279,936	1,417
1,2	172,8	338,688	1,422
1,2	172,8	402,624	1,426
1,2	172,8	473,472	1,416
1,2	172,8	549,504	1,422
1,2	172,8	630,72	1,426
1,2	172,8	1121,472	1,430
1,2	172,8	1752,192	1,423
1,2	172,8	7010,496	1,428
1,2	172,8	15776,64	1,426
1,2	172,8	26500,61	1,428

Tabel B.3 Perhitungan koefisien tekanan barat laut

U_0 (m/s)	U_b (m/s)	U (m/s)	P (Pa)	ΔP (Pa)	C_p
0,74	0,25	0,12	0,28	1,65	0,974
1,48	0,5	0,25	1,13	6,6	0,971
1,63	0,54	0,27	1,37	7,99	0,973
1,78	0,59	0,29	1,63	9,51	0,973
1,93	0,64	0,32	1,92	11,17	0,973
2,08	0,69	0,35	2,22	12,96	0,972
2,22	0,74	0,37	2,55	14,89	0,972
2,97	0,99	0,5	4,54	26,5	0,972
3,72	1,24	0,62	7,1	41,45	0,972
7,45	2,48	1,24	28,4	166,18	0,972
11,16	5,78	3,72	63,8	372,7	0,889
14,51	7,25	2,41	107,33	629,2	0,972

Tabel B.4 Perhitungan koefisien gaya barat laut

ρ (kg/m ³)	A (m ²)	F (N)	C_d
1,293	1052,8	294,784	0,791
1,293	1052,8	1189,664	0,798
1,293	1052,8	1442,336	0,798
1,293	1052,8	1716,064	0,796
1,293	1052,8	2021,376	0,797
1,293	1052,8	2337,216	0,794
1,293	1052,8	2684,64	0,800
1,293	1052,8	4779,712	0,796
1,293	1052,8	7474,88	0,794
1,293	1052,8	29899,52	0,791
1,293	1052,8	67168,64	0,792
1,293	1052,8	112997	0,789

Tabel B.5 Perhitungan koefisien tekanan utara

U_0 (m/s)	U_b (m/s)	U (m/s)	P (Pa)	ΔP (Pa)	C_p
0,6	0,26	0,13	0,684	1,772	0,953
1,55	0,5	0,25	2,74	7,552	0,974
1,71	0,57	0,29	3,32	9,11	0,971
1,87	0,62	0,31	3,95	10,86	0,973
2,03	0,68	0,34	4,64	12,73	0,972
2,18	0,73	0,36	5,38	14,76	0,973
2,34	0,78	0,39	6,18	16,95	0,972
3,12	1,04	0,52	10,99	30,15	0,972
3,9	1,3	0,65	17,19	37,14	0,972
7,81	2,6	1,3	68,87	188,79	0,972
11,72	3,9	1,95	155,01	425,2	0,972
15,19	5,07	2,53	260,64	714	0,972

Tabel B.6 Perhitungan koefisien gaya utara

ρ (kg/m ³)	A (m ²)	F (N)	C_d
1,2	880	601,92	2,939
1,2	880	2411,2	1,764
1,2	880	2921,6	1,756
1,2	880	3476	1,747
1,2	880	4083,2	1,742
1,2	880	4734,4	1,751
1,2	880	5438,4	1,746
1,2	880	9671,2	1,746
1,2	880	15127,2	1,748
1,2	880	60605,6	1,746
1,2	880	136408,8	1,746
1,2	880	229363,2	1,747

Tabel B.7 Perhitungan koefisien tekanan timur

U_0 (m/s)	U_b (m/s)	U (m/s)	P (Pa)	ΔP (Pa)	C_p
0,7	0,23	0,12	0,55	1,32	0,971
1,4	0,47	0,23	2,22	5,29	0,973
1,54	0,51	0,26	2,69	6,4	0,971
1,68	0,56	0,28	3,2	7,62	0,972
1,81	0,61	0,3	3,75	8,95	0,973
1,95	0,65	0,33	4,35	10,38	0,971
2,03	0,7	0,35	4,99	11,92	0,970
2,79	0,93	0,47	8,88	21,19	0,972
3,49	1,16	0,58	13,89	33,13	0,972
7	2,33	1,16	55,58	132,6	0,973
10,46	3,49	1,74	125,09	298,5	0,972
13,56	4,52	2,26	210,14	501,4	0,972

Tabel B.8 Perhitungan koefisien gaya timur

ρ (kg/m ³)	A (m ²)	F (N)	C_d
1,2	115,2	63,36	1,736
1,2	115,2	255,744	1,752
1,2	115,2	309,888	1,754
1,2	115,2	368,64	1,754
1,2	115,2	432	1,771
1,2	115,2	501,12	1,770
1,2	115,2	574,848	1,873
1,2	115,2	1022,976	1,765
1,2	115,2	1600,128	1,764
1,2	115,2	6402,816	1,755
1,2	115,2	14410,37	1,768
1,2	115,2	24208,13	1,768

LAMPIRAN C

DATA PENUNJANG

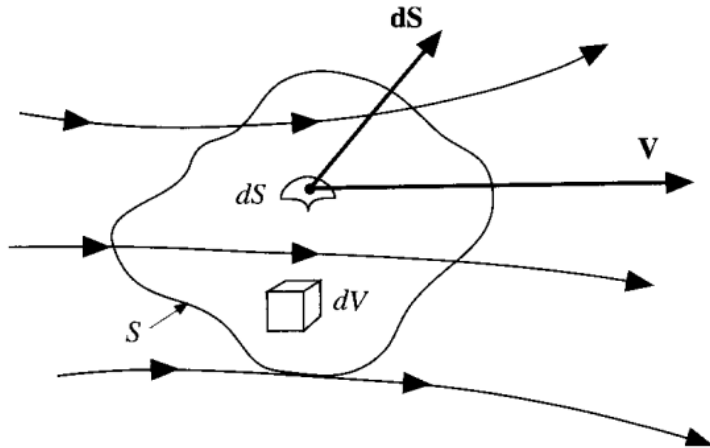
Wind speed equivalents

Beaufort scale number and description	Wind speed equivalent at a standard height of 10 metres above open flat ground				Specifications for estimating speed over land
	(knots)	(m s ⁻¹)	(km h ⁻¹)	(mi h ⁻¹)	
0 Calm	<1	0 – 0.2	<1	<1	Calm; smoke rises vertically.
1 Light air	1 – 3	0.3 – 1.5	1 – 5	1 – 3	Direction of wind shown by smoke-drift but not by wind vanes.
2 Light breeze	4 – 6	1.6 – 3.3	6 – 11	4 – 7	Wind felt on face; leaves rustle; ordinary vanes moved by wind.
3 Gentle breeze	7 – 10	3.4 – 5.4	12 – 19	8 – 12	Leaves and small twigs in constant motion; wind extends light flag.
4 Moderate breeze	11 – 16	5.5 – 7.9	20 – 28	13 – 18	Raises dust and loose paper; small branches are moved.
5 Fresh breeze	17 – 21	8.0 – 10.7	29 – 38	19 – 24	Small trees in leaf begin to sway; crested wavelets form on inland waters.
6 Strong breeze	22 – 27	10.8 – 13.8	39 – 49	25 – 31	Large branches in motion; whistling heard in telegraph wires; umbrellas used with difficulty.
7 Near gale	28 – 33	13.9 – 17.1	50 – 61	32 – 38	Whole trees in motion; inconvenience felt when walking against the wind.
8 Gale	34 – 40	17.2 – 20.7	62 – 74	39 – 46	Breaks twigs off trees; generally impedes progress.
9 Strong gale	41 – 47	20.8 – 24.4	75 – 88	47 – 54	Slight structural damage occurs (chimney-pots and slates removed).
10 Storm	48 – 55	24.5 – 28.4	89 – 102	55 – 63	Seldom experienced inland; trees uprooted; considerable structural damage occurs.
11 Violent storm	56 – 63	28.5 – 32.6	103 – 117	64 – 72	Very rarely experienced; accompanied by widespread damage.
12 Hurricane	64 and over	32.7 and over	118 and over	73 and over	

Gambar C.1 Skala Beaufort

LAMPIRAN D PENURUNAN RUMUS CFD

I. Persamaan kontinuitas



Gambar D.2 *Finite control volume fixed in space* (Anderson, 1995)
Berdasarkan Gambar didapat kan persamaan massa aliran dari fluida yang melewati area dS adalah

$$\rho V_n dS = \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{S} \quad (1)$$

Jika persamaan (1) dibawa ke bentuk integral akan menjadi

$$\dot{B} = \iint_S \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{S} \quad (2)$$

Massa dalam elemn volume dV adalah ρdV maka total massa dalam *control volume* adalah :

$$\iiint_V \rho dV \quad (3)$$

Perubahan massa di dalam volum V adalah

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV \quad (4)$$

Perubaha massa terhadap waktu = $\frac{\partial \rho}{\partial t} (dxdydz)$ (5)

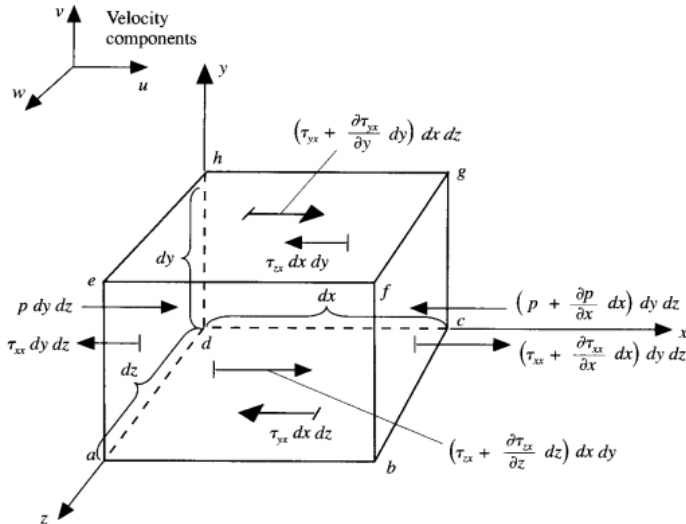
Prinsip fisika dari konservasi massa dapat di rumuskan dalam persamaan berikut

$$\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] dxdydz = - \frac{\partial \rho}{\partial t} (dxdydz) \frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] = 0 \quad (6)$$

Atau dapat disederhanakan menjadi

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (7)$$

II. Persamaan momentum



Gambar D.3 Pergerakan fluida, gaya pada sumbu x untuk menurunkan persamaan momentum (Anderson, 1995)

Hukum Newton 2 pada sumbu x dapat dirumuskan sebagai :

$$F_x = ma_x \quad (7)$$

Elemen fluida yang bergerak dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 &= \left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] dydz \\
 &+ \left[\left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \right) - \tau_{xx} \right] dydz \\
 \text{Net surface force pada arah x} &+ \left[\left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) - \tau_{yx} \right] dx dz \\
 &+ \left[\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) - \tau_{zx} \right] dx dy
 \end{aligned} \tag{8}$$

Total gaya yang bekerja pada sumbu x menjadi :

$$F_x = \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] dx dy dz + \rho f_x dx dy dz \tag{9}$$

Massa dari elemen fluida akan sama dengan :

$$m = \rho dx dy dz \tag{10}$$

Percepatan didapatkan dari perubahan kecepatan terhadap waktu

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \tag{11}$$

Menggabungkan persamaan 7, 9 dan 11, maka akan didapatkan

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \tag{12a}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \tag{12b}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \tag{12.c}$$

Persamaan Navier-Stokes dapat dituliskan dalam bentuk turunan, sehingga didapatkan

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho V \cdot \nabla u \quad (13)$$

Atau juga dapat disusun menjadi

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} &= \rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial t} \\ \rho \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned} \quad (14)$$

Jika ditambahkan vektor menjadi :

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho u V) &= u \nabla \cdot (\rho V) - (\rho V) \cdot \nabla u \\ \rho V \cdot \nabla u &= \nabla \cdot (\rho u V) - u \nabla \cdot (\rho V) \end{aligned} \quad (15)$$

Substitusikan persamaan 13, 14, 15 didapatkan

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} - u \nabla \cdot (\rho V) + \nabla \cdot (\rho u V) \\ \rho \frac{Du}{Dt} &= \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} - u \nabla \cdot (\rho V) \right] + \nabla \cdot (\rho u V) \end{aligned} \quad (16)$$

Dapat disederhanakan menjadi

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) \quad (17)$$

Substitusikan persamaan 12 dan 17, didapatkan

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (18a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (18b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w V) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (18c)$$

Berdasarkan penemuan yang didapatkan oleh Stokes tahun 1845 yaitu :

$$\tau_{xx} = \lambda(\nabla \cdot V) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (19a)$$

$$\tau_{yy} = \lambda(\nabla \cdot V) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (19b)$$

$$\tau_{zz} = \lambda(\nabla \cdot V) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (19c)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (19d)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (19e)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left[\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right] \quad (19f)$$

Jika μ adalah viskositas molekular dan λ adalah koefisien viskositas kedua, Stokes menjabarkan bahwa :

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad (20)$$

Substitusi persamaan 18 dan 19 didapatkan persamaan konservasi momentum yaitu :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (21a)$$

$$\begin{aligned} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (21b)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho f_y$$

$$\left[\left(u\tau_{yx} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} \right) - u\tau_{yx} \right] dx dz = \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} dx dy dz \quad (25)$$

Gaya yang bekerja pada elemen yang bergerak dalam fluida adalah

$$\left[-\frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (26)$$

C dapat dirumuskan seperti persamaan berikut

$$C = - \left[\begin{aligned} & \left(\frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(vp)}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial(wp)}{\partial z} \\ & + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} \\ & + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} \\ & + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} \\ & + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \end{aligned} \right] dx dy dz + \rho f \cdot V dx dy dz \quad (27)$$

Penambahan perubahan panas per satuan massa

$$\text{Volumetric heating of element} = \rho \dot{q} dx dy dz \quad (28)$$

Perpindahan panas pada sumbu x karena konduksi panas adalah :

$$\left[\dot{q}_x - \left(\dot{q}_x + \frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} \right) \right] dy dz = - \frac{\partial \dot{q}}{\partial x} dx dy dz \quad (29)$$

$$\text{Heating of fluid element by conduction} = - \left(\frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \dot{q}_y}{\partial y} + \frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (30)$$

B adalah penjumlahan dari persamaan 29 dan 30, dapat ditulis :

$$B = \left[\rho \dot{q} - \left(\frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \dot{q}_y}{\partial y} + \frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad (31)$$

Berdasarkan hukum Fourier tentang konduksi panas persamaan 31 dapat ditulis ulang menjadi

$$B = \left[\rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad (32)$$

Dengan mempertimbangkan A sebagai energi total, didapatkan persamaan berikut :

$$A = \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) dx dy dz \quad (33)$$

Bentuk akhir dari persamaan energi adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) &= \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial(u p)}{\partial x} + \frac{\partial(v p)}{\partial y} + \frac{\partial(w p)}{\partial z} + \frac{\partial(u \tau_{xx})}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \tau_{yy})}{\partial y} \\ &+ \frac{\partial(v \tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w \tau_{zz})}{\partial z} + \rho f \cdot V \end{aligned} \quad (34)$$

Dengan mempertimbangkan energi internal, persamaan 34 dapat ditulis kembali sebagai berikut :

$$\rho \frac{D(u^2 / 2)}{Dt} = -u \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho u f_x \quad (35)$$

$$\rho \frac{D(v^2 / 2)}{Dt} = -v \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho v f_y \quad (36)$$

$$\rho \frac{D(w^2 / 2)}{Dt} = -w \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho w f_z \quad (37)$$

Menjumlahkan persamaan 25, 36 dan 37 dengan $u^2+v^2+w^2 = V^2$ kemudian dikurangi dengan persamaan 34 didapatkan persamaan baru yaitu :

$$\begin{aligned} \rho \frac{De}{Dt} = & \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & - p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} \\ & + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} \end{aligned} \quad (38)$$